



THÈSE DE DOCTORAT

ANNÉE UNIVERSITAIRE

2025 - 2026

N° D'ORDRE :

174

FORMATION DOCTORALE

AGRICULTURE ET ENVIRONNEMENT TROPICAL

Mention : Géosciences et Environnement

Spécialité : Agro-climatologie

THÈME :

Évaluation des ressources en eau de surface dans
le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona
pour la production du sucre de canne : cas du
complexe sucrier de Borotou-Koro
(Nord-Ouest, Côte d'Ivoire)

Prénom : Yaya

NOM : KONATE

JURY

- Président** : Monsieur DIBI Brou, Professeur Titulaire, Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ
- Directeur** : Monsieur KOUADIO Zilé Alex, Maître de Conférences, Université Jean LOROUGNON GUEDE
- Rapporteur** : Monsieur ASSOMA Tchimou Vincent, Maître de Conférences, Université Felix HOUPOUËT-BOIGNY
- Examineur** : Monsieur KOUASSI Kouakou Hervé, Maître de Conférences, Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ
- Examineur** : Monsieur FADIKA Vamoryba, Maître de Conférences, Université NANGUI ABROGOUA

Soutenue le 31 /01/2026

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|--------------|
| DÉDICACE | xi |
| REMERCIEMENTS | xii |
| LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS | xv |
| LISTE DES TABLEAUX | xvii |
| LISTE DES FIGURES | xix |
| LISTE DES ANNEXES | xxiii |
| INTRODUCTION | 1 |
| PARTIE I : GÉNÉRALITÉS | 5 |
| CHAPITRE 1 : CARACTÉRISTIQUES DU BASSIN VERSANT DU FLEUVE SASSANDRA À SOROTONA ET DU COMPLEXE SUCRIER DE BOROTOU-KORO | 6 |
| 1.1. Localisation du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona..... | 6 |
| 1.2. Caractéristiques hydroclimatiques du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona | 7 |
| 1.2.1. Climat dans le bassin versant | 7 |
| 1.2.2. Hydrographie du bassin versant | 7 |
| 1.3. Caractéristiques physiques du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona..... | 8 |
| 1.3.1. Relief du bassin versant..... | 8 |
| 1.3.2. Géologie du bassin versant..... | 9 |
| 1.3.3. Situation agro-pédologique du bassin versant..... | 10 |
| 1.3.4. Végétation du bassin versant | 11 |
| 1.4. Présentation de la structure d'accueil : Sucrivoire | 11 |
| 1.4.1. Historique | 11 |
| 1.4.2. Organisation générale de Sucrivoire..... | 12 |
| 1.4.3. Unité Agricole Intégrée de Borotou-Koro (UAIBK) | 13 |
| 1.4.4. Population dans l'UAIBK | 14 |
| 1.4.5. Activités socio-économiques dans l'UAIBK | 14 |
| Conclusion partielle..... | 15 |
| CHAPITRE 2 : VARIABILITÉ CLIMATIQUE ET AGRICULTURE EN AFRIQUE DE L'OUEST | 16 |
| 2.1. Variabilité hydroclimatique en Afrique de l'Ouest..... | 16 |
| 2.1.1. Facteurs du climat en Afrique de l'Ouest..... | 16 |
| 2.1.2. Variation pluviométrique en Afrique de l'Ouest..... | 17 |
| 2.1.3. Variation des écoulements en Afrique de l'Ouest | 19 |
| 2.1.4. Causes de la variabilité hydroclimatique..... | 20 |
| 2.1.5. Évolution hydroclimatique dans un contexte de changement climatique en Afrique de l'Ouest | 22 |
| 2.2. Lien entre le climat et l'agriculture | 23 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3. Impact du changement climatique sur l'agriculture | 24 |
| 2.4. Couplage sciences du climat et sciences agronomiques..... | 25 |
| 2.5. Variabilité hydroclimatique en Côte d'Ivoire..... | 26 |
| 2.6. Variabilité hydroclimatique face aux enjeux socio-économiques | 27 |
| Conclusion partielle..... | 28 |
| CHAPITRE 3 : GENERALITE SUR LA CANNE A SUCRE | 29 |
| 3.1. Origine de la canne à sucre..... | 29 |
| 3.2. Description de la canne à sucre | 29 |
| 3.3. Botanique de la canne à sucre | 29 |
| 3.3.1. Classification systématique de la canne à sucre | 29 |
| 3.3.2. Système racinaire de la canne à sucre | 30 |
| 3.3.3. Différents types de racine de la canne à sucre..... | 30 |
| 3.3.4. Tige de la canne à sucre..... | 31 |
| 3.3.5. Feuille de la canne à sucre..... | 32 |
| 3.4. Cycle végétatif de la canne à sucre..... | 33 |
| 3.5. Condition pédoclimatique de culture de la canne à sucre | 33 |
| 3.6. Physiologie de la canne à sucre | 34 |
| 3.6.1. Absorption de l'eau | 34 |
| 3.6.2. Absorption des minéraux..... | 34 |
| 3.6.3. Transpiration | 35 |
| 3.7. Croissance et développement de la canne à sucre | 35 |
| 3.7.1. Levée de la canne à sucre | 35 |
| 3.7.2. Tallage de la canne à sucre..... | 36 |
| 3.7.3. Élongation et croissance de la canne à sucre | 36 |
| 3.7.4. Maturation de la canne à sucre | 37 |
| 3.7.4.1. Maturation naturelle | 37 |
| 3.7.4.2. Maturation artificielle..... | 37 |
| 3.8. Changement climatique et production de la canne à sucre..... | 37 |
| 3.8.1. Enjeux liés au changement climatique pour la culture de la canne à sucre | 37 |
| 3.8.2. Impact du changement climatique sur la culture de la canne à sucre | 38 |
| Conclusion partielle..... | 38 |
| PARTIE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES | 39 |
| CHAPITRE 4 : MATÉRIEL..... | 40 |
| 4.1. Données..... | 40 |
| 4.1.1. Données climatiques..... | 40 |
| 4.1.2. Données agronomiques | 42 |

| | | |
|-----------------------------------|---|-----------|
| 4.1.3. | Données hydrométriques | 42 |
| 4.1.4. | Données de télédétection | 44 |
| 4.1.4.1. | Images satellitaires Landsat | 44 |
| 4.1.4.2. | Données images ASTER | 45 |
| 4.2. | Logiciels utilisés | 45 |
| Conclusion partielle..... | | 45 |
| CHAPITRE 5 : MÉTHODES..... | | 46 |
| 5.1. | Caractérisation des paramètres agroclimatiques du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona | 46 |
| 5.1.1. | Détermination des paramètres agroclimatiques du bassin versant | 46 |
| 5.1.1.1. | Début de la saison des pluies (DSP)..... | 46 |
| 5.1.1.2. | Fin de la saison des pluies (FSP)..... | 47 |
| 5.1.1.3. | Longueur de la saison des pluies (LSP)..... | 47 |
| 5.1.1.4. | Nombre de jours de pluie (NJP) | 48 |
| 5.1.1.5. | Cumul de précipitation saisonnière (CPS)..... | 48 |
| 5.1.1.6. | Hauteur journalière moyenne de précipitation (HMP) | 48 |
| 5.1.1.7. | Séquences sèches saisonnières (SS) | 48 |
| 5.1.2. | Analyse des tendances dans les paramètres agroclimatiques et hydrométriques | 49 |
| 5.1.2.1. | Test de tendance de Mann-Kendall appliqué aux paramètres agroclimatiques et hydrométriques | 49 |
| 5.1.2.2. | Test séquentiel de Mann-Kendall appliqué aux paramètres agroclimatiques et aux données hydrométriques..... | 50 |
| 5.1.2.3. | Détermination des débuts de tendances des paramètres agroclimatiques et hydrométriques | 50 |
| 5.1.3. | Analyse de la corrélation entre la pluviométrie, les paramètres agroclimatiques et la production..... | 51 |
| 5.1.3.1. | Significativité de la corrélation | 51 |
| 5.1.3.2. | Analyse de la corrélation entre les paramètres agroclimatiques et la production agricole | 51 |
| 5.1.4. | Détermination du calendrier culturel de la canne à sucre..... | 52 |
| 5.1.5. | Étude des tendances pluviométriques dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona | 53 |
| 5.1.5.1. | Analyse spatio-temporelle de la pluviométrie dans le bassin versant..... | 53 |
| 5.1.5.2. | Analyse des indices standardisés de Précipitation et d'Evapotranspiration (SPEI)..... | 53 |
| 5.1.5.3. | Durée des séquences de sécheresse | 54 |
| 5.1.5.4. | Intensité des séquences de sécheresse | 54 |
| 5.1.6. | Évaluation des paramètres du changement climatique dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona..... | 55 |
| 5.1.6.1. | Évaluation de la fiabilité des sorties des modèles climatiques | 55 |

| | |
|--|----|
| 5.1.6.2. Correction des sorties des modèles climatiques | 55 |
| 5.1.6.3. Détermination des taux de variation des paramètres climatiques..... | 56 |
| 5.2. Évaluation de la disponibilité de l'eau dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona. | 56 |
| 5.2.1. Caractérisation des écoulements dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona... | 56 |
| 5.2.1.1. Détermination des lames d'eau écoulées (Le)..... | 56 |
| 5.2.1.2. Coefficient d'écoulement (Ce) | 57 |
| 5.2.1.3. Étude de la variation des écoulements..... | 57 |
| 5.2.1.4. Indice de sécheresse hydrologique dans le bassin versant (SDI) | 57 |
| 5.2.2. Étude de l'évolution des écoulements dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona..... | 58 |
| 5.2.2.1. Coefficient d'hydraulicité..... | 58 |
| 5.2.2.2. Détermination du régime hydrologique dans le bassin versant..... | 58 |
| 5.2.2.3. Débits d'étiage..... | 59 |
| 5.2.2.4. Débits d'étiage absolu | 59 |
| 5.2.2.5. Débits caractéristiques d'étiage (DCE) | 59 |
| 5.2.2.6. Débit moyen mensuel (QMNA) | 59 |
| 5.2.2.7. Débits moyens minimums journaliers (VCN _d)..... | 60 |
| 5.2.3. Simulation des écoulements dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona avec le modèle hydrologique CEQUEAU | 60 |
| 5.2.3.1. Étude de la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant | 60 |
| 5.2.3.1.1. Prétraitement des images..... | 61 |
| 5.2.3.1.2. Traitement des images | 61 |
| 5.2.3.1.3. Interprétation visuelle et identification des classes d'occupation du sol | 62 |
| 5.2.3.1.4. Classification des images satellitaires | 62 |
| 5.2.3.2. Analyse de la dynamique des changements de classe d'occupation du sol de 1986, 2003 et 2020 | 64 |
| 5.2.3.2.1. Calcul du taux d'évolution (E) | 65 |
| 5.2.3.2.2. Calcul du taux moyen annuel d'expansion spatiale (T)..... | 65 |
| 5.2.3.2.3. Calcul de la vitesse d'évolution des catégories d'occupation du sol..... | 65 |
| 5.2.4. Application du modèle LCM pour la prédiction de l'évolution de l'occupation du sol dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona..... | 66 |
| 5.2.4.1. Données d'entrée du modèle LCM..... | 66 |
| 5.2.4.1.1. Cartes d'occupation du sol | 66 |
| 5.2.4.1.2. Facteurs explicatifs des changements observés..... | 67 |
| 5.2.4.2. Traitements (modules)..... | 67 |
| 5.2.4.2.1. Analyse des changements | 68 |
| 5.2.4.2.2. Modélisation du potentiel de transition | 68 |
| 5.2.4.2.3. Prédiction des changements d'occupation du sol | 68 |

| | |
|---|-----------|
| 5.2.4.3. Validation du modèle | 69 |
| 5.2.5. Application du modèle CEQUEAU au bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona | 69 |
| 5.2.5.1. Principe de fonctionnement du modèle CEQUEAU | 70 |
| 5.2.5.2. Traitement des données | 70 |
| 5.2.5.2.1. Données physiographiques | 70 |
| 5.2.5.2.2. Données de bassin versant | 72 |
| 5.2.5.2.3. Données météorologiques et hydrométriques..... | 72 |
| 5.2.5.2.4. Calage du modèle | 73 |
| 5.2.5.2.5. Critères du calage | 75 |
| 5.2.6. Scénarios de simulation des écoulements dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona..... | 76 |
| 5.2.7. Évaluation de la disponibilité future en eau dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona..... | 76 |
| 5.2.7.1. Débit réservé..... | 77 |
| 5.2.7.2. Débit prélevable..... | 77 |
| 5.3. Établissement du rapport entre les besoins et la disponibilité de l'eau dans le complexe sucrier de Borotou-Koro..... | 77 |
| 5.3.1. Détermination du besoin en eau de la canne à sucre dans le complexe sucrier de Borotou Koro..... | 77 |
| 5.3.1.1. Détermination des évapotranspirations dans le complexe sucrier de Borotou-Koro.... | 77 |
| 5.3.1.1.1. Évapotranspiration Potentielle (ETP) ou de référence (ET ₀)..... | 77 |
| 5.3.1.1.2. Évapotranspiration maximale de cultures (ET _c)..... | 78 |
| 5.3.1.2. Détermination des besoins nets et besoins en eau d'irrigation | 78 |
| 5.3.2. Coefficient cultural (K _c)..... | 79 |
| 5.3.3. Détermination des besoins futurs en eau de la canne à sucre | 80 |
| Conclusion partielle..... | 80 |
| PARTIE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION | 82 |
| CHAPITRE 6 : ÉTUDE DE LA CARACTÉRISATION DES PARAMÈTRES AGROCLIMATIQUES DANS LE BASSIN VERSANT DU FLEUVE SASSANDRA À SOROTONA..... | 83 |
| 6.1. Caractérisation des paramètres agroclimatiques dans le bassin versant et leur impact sur la culture de canne à sucre..... | 83 |
| 6.1.1. Analyse du début de la saison des pluies (DSP)..... | 83 |
| 6.1.2. Analyse de la fin de la saison des pluies (FSP) | 84 |
| 6.1.3. Analyse de la longueur de la saison des pluies (LSP) | 85 |
| 6.1.4. Nombre de jours de pluie (NJP) | 86 |
| 6.1.5. Cumul de précipitation saisonnière (CPS)..... | 87 |
| 6.1.6. Hauteur journalière moyenne des précipitations (HMP) | 89 |

| | |
|---|------------|
| 6.1.7. Séquences sèches saisonnières (SS) | 90 |
| 6.2. Impact des paramètres agroclimatiques sur la culture de canne à sucre dans le bassin versant . | 92 |
| 6.2.1. Comparaison entre la pluviométrie et rendement de canne à sucre..... | 92 |
| 6.2.2. Analyse de la corrélation entre les paramètres agroclimatiques et les paramètres agricoles | 92 |
| 6.3. Analyse des tendances des paramètres agroclimatiques..... | 96 |
| 6.3.1. Test de Mann-Kendall appliqué aux paramètres agroclimatiques..... | 96 |
| 6.3.2. Test de Mann-Kendall séquentiel appliqué aux paramètres agroclimatiques..... | 98 |
| 6.4. Détermination du calendrier cultural et adaptation de la culture de canne à sucre dans le bassin versant | 100 |
| 6.4.1. Calendrier cultural dans le bassin versant selon les données climatiques | 100 |
| 6.4.2. Adaptation de la culture de canne à sucre au calendrier cultural | 101 |
| 6.5. Analyse des tendances pluviométriques dans le bassin versant | 102 |
| 6.5.1. Variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie dans le bassin versant | 102 |
| 6.5.2. Variation des indices standardisés de précipitation et d'évapotranspiration (SPEI) | 105 |
| 6.5.3. Intensité, fréquence et durée des indices standardisés de précipitation et d'évapotranspiration..... | 106 |
| 6.6. Évolution des paramètres climatiques aux horizons futurs | 107 |
| 6.6.1. Erreur moyenne annuelle des précipitations et des températures simulées par les modèles climatiques..... | 107 |
| 6.6.2. Correction des biais et fiabilité des sorties des modèles climatiques | 109 |
| 6.6.3. Variation future des précipitations dans le bassin versant..... | 111 |
| 6.6.4. Variation future des températures dans le bassin versant..... | 112 |
| Discussion | 113 |
| Conclusion partielle..... | 116 |
| CHAPITRE 7 : ÉVALUATION DE LA DISPONIBILITÉ DE L'EAU DANS LE BASSIN VERSANT DU FLEUVE SASSANDRA À SOROTONA | 117 |
| 7.1. Analyse des variables d'écoulement dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona.. | 117 |
| 7.1.1. Coefficients d'hydraulicité annuels | 117 |
| 7.1.2. Coefficient de variation des écoulements (Cv)..... | 118 |
| 7.1.3. Relation pluie-débit dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona..... | 118 |
| 7.1.3.1. Relation pluie-débit à l'échelle annuelle dans le bassin versant..... | 118 |
| 7.1.3.2. Relation pluie-débit à l'échelle mensuelle dans le bassin versant | 119 |
| 7.1.3.3. Corrélation pluie-débit dans le bassin versant | 120 |
| 7.1.4. Analyse des déficits d'écoulement dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona | 120 |
| 7.1.4.1. Analyse des lames d'eau écoulées et du déficit d'écoulement à l'échelle annuelle ... | 120 |
| 7.1.4.2. Analyse des lames d'eau écoulées et déficit d'écoulement à l'échelle mensuelle..... | 121 |

| | |
|---|-----|
| 7.1.5. Analyse des écoulements dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona | 122 |
| 7.1.5.1. Analyse des modules d'écoulements interannuels dans le bassin versant | 122 |
| 7.1.5.2. Analyse des écoulements maximums annuels dans le bassin versant | 123 |
| 7.1.5.3. Analyse des écoulements minimums annuels dans le bassin versant | 123 |
| 7.1.5.4. Analyse des écoulements maximums mensuels dans le bassin versant..... | 124 |
| 7.1.5.5. Analyse des écoulements minimums mensuels dans le bassin versant | 125 |
| 7.1.6. Détermination du régime hydrologique dans le bassin versant | 125 |
| 7.1.7. Application du test de Mann-Kendall aux séries de débits mensuels..... | 126 |
| 7.1.7.1. Analyse des tendances dans les séries de débits mensuels sur le bassin versant..... | 126 |
| 7.1.7.2. Test de Mann-Kendall séquentiel dans les séries de débits mensuels dans le bassin versant | 128 |
| 7.2. Analyse des écoulements journaliers dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona . | 130 |
| 7.2.1. Écoulements moyens journaliers dans le bassin versant | 130 |
| 7.2.2. Débits classés dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona..... | 130 |
| 7.2.3. Fréquence des débits journaliers | 131 |
| 7.2.4. Étude des étiages dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona (1970- 2020)... | 132 |
| 7.2.4.1. Débits caractéristiques d'étiage (DCE) | 132 |
| 7.2.4.2. Débits moyens mensuels minimums annuels (QMNA) | 132 |
| 7.2.4.3. Indice de sévérité des étiages (ISE) dans le bassin versant | 133 |
| 7.2.4.4. Débits moyens minimums journaliers (VCN _d)..... | 134 |
| 7.2.4.5. Durée des étiages..... | 135 |
| 7.3. Modélisation des écoulements d'eau futurs dans le bassin versant..... | 135 |
| 7.3.1. Évaluation de la précision d'élaboration des cartes d'occupation du sol | 136 |
| 7.3.2. Occupation du sol dans le bassin versant en 1986..... | 138 |
| 7.3.3. Occupation du sol dans le bassin versant en 2003..... | 139 |
| 7.3.4. Occupation du sol dans le bassin versant en 2020..... | 141 |
| 7.3.5. Dynamique des classes d'occupation du sol dans le bassin versant..... | 142 |
| 7.3.5.1. Dynamique de l'occupation du sol entre 1986 et 2003 | 142 |
| 7.3.5.1.1. Cartographie des changements d'occupation du sol entre 1986 et 2003 | 143 |
| 7.3.5.1.2. Matrice de transition de l'occupation du sol entre 1986 et 2003..... | 144 |
| 7.3.5.2. Dynamique de l'occupation du sol entre 2003 et 2020 | 145 |
| 7.3.5.2.1. Cartographie des changements d'occupation du sol entre 2003 et 2020..... | 146 |
| 7.3.5.2.2. Matrice de transition de l'occupation du sol entre 2003 et 2020..... | 147 |
| 7.3.5.3. Dynamique de l'occupation du sol entre 1986 et 2020 | 148 |
| 7.3.5.4. Variation du taux moyen annuel d'expansion entre 1986 et 2020..... | 149 |
| 7.4. Prédiction de l'occupation du sol dans le bassin versant avec le module Land Change Modeler (LCM)..... | 149 |

| | |
|--|------------|
| 7.4.1. Analyse des changements..... | 149 |
| 7.4.2. Variables explicatives des changements observés..... | 150 |
| 7.4.3. Modélisation du potentiel de transition | 152 |
| 7.4.3.1. Choix des transitions et sous-modèle de modélisation..... | 152 |
| 7.4.3.2. Potentiel de transition..... | 152 |
| 7.4.4. Validation du modèle Land Change Modeler..... | 153 |
| 7.4.5. Simulation des cartes d'occupation du sol aux horizons futurs..... | 155 |
| 7.5. Application du modèle hydrologique CEQUEAU au bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona | 157 |
| 7.5.1. Données préparées..... | 157 |
| 7.5.1.1. Carreaux entiers et carreaux partiels | 157 |
| 7.5.1.2. Données du bassin versant..... | 158 |
| 7.5.1.3. Précisions des surfaces | 159 |
| 7.5.1.4. Données physiographiques..... | 159 |
| 7.5.1.5. Paramètres optimaux de simulation dans le bassin versant avec le modèle CEQUEAU | 160 |
| 7.5.2. Critères de calage et de validation du modèle dans le bassin versant | 160 |
| 7.5.2.1. Critères numériques..... | 160 |
| 7.5.2.2. Critères graphiques..... | 161 |
| 7.5.3. Analyse des résultats de la validation à l'échelle mensuelle | 163 |
| 7.6. Suivi des écoulements dans le bassin versant face au changement d'occupation du sol et au changement climatique..... | 164 |
| 7.6.1. Évaluation des écoulements dans le bassin versant avec la dynamique de l'occupation du sol | 164 |
| 7.6.1.1. Évolution des écoulements avec l'occupation du sol passée dans le bassin versant .. | 164 |
| 7.6.1.2. Évolution des écoulements avec l'occupations du sol futur dans le bassin versant ... | 166 |
| 7.6.1.3. Évolution mensuelle des écoulements dans le bassin versant avec les changements d'occupation du sol | 167 |
| 7.6.2. Évaluation des écoulements dans le bassin versant face au changement climatique | 168 |
| 7.6.3. Effet combiné du changement climatique et des changements d'occupation du sol sur les écoulements dans le bassin versant | 170 |
| 7.6.3.1. Effet combiné de l'occupation du sol 2034 au changement climatique | 170 |
| 7.6.3.2. Effet combiné de l'occupation du sol de 2054 au changement climatique..... | 173 |
| 7.7. Caractérisation de la sécheresse hydrologique future dans le bassin versant | 176 |
| 7.7.1. Indice de sécheresse hydrologique (SDI) des écoulements futurs..... | 176 |
| 7.7.2. Intensité et durée des séquences de sécheresse hydrologique futures | 178 |
| 7.7.3. Fréquence des séquences de sécheresse hydrologique future..... | 179 |
| 7.7.4. Analyse des régimes hydrologiques dans le bassin versant..... | 180 |

| | |
|--|------------|
| Discussion | 180 |
| Conclusion partielle..... | 186 |
| CHAPITRE 8 : RAPPORT ENTRE LA DEMANDE ET LA DISPONIBILITÉ EN EAU DANS L'EXPLOITATION AGRICOLE DE BOROTOU KORO | 187 |
| 8.1. Analyse des besoins en eau dans le complexe sucrier de Borotou-Koro | 187 |
| 8.1.1. Évolution mensuelle de l'ETP dans le bassin versant | 187 |
| 8.1.2. Évolution annuelle de l'ETP dans le bassin versant..... | 187 |
| 8.1.3. Coefficient cultural..... | 188 |
| 8.1.4. Suivi des besoins en eau de la canne à sucre selon les stades phénologiques | 189 |
| 8.1.5. Suivi des besoins de la canne selon la date de plantation ou de repousse | 190 |
| 8.2. Consommation en eau dans le complexe sucrier de Borotou-Koro | 192 |
| 8.2.1. Consommation mensuelle en eau par secteur d'activité..... | 192 |
| 8.2.2. Eau d'irrigation par campagne dans les exploitations agricoles..... | 192 |
| 8.2.3. Évolution de la consommation globale en eau d'irrigation par campagne entre 2012-2020 | 193 |
| 8.3. Détermination des besoins en eau futurs de la canne à sucre dans les exploitations agricoles de Borotou Koro..... | 194 |
| 8.3.1. Impact du changement climatique sur l'ETP et la précipitation..... | 194 |
| 8.3.2. Évaluation mensuelle des besoins futurs de la canne à sucre selon les modèles climatiques | 196 |
| 8.3.3. Évaluation des besoins futurs de la canne à sucre par campagne agricole | 198 |
| 8.3.3.1. Prévision des besoins futurs de la canne à sucre selon le modèle RCA4 | 198 |
| 8.3.3.2. Prévision des besoins en eau de la canne à sucre selon le modèle REMO2009..... | 199 |
| 8.3.3.3. Prévision des besoins en eau de la canne à sucre selon le modèle RACMO22T | 200 |
| 8.4. Détermination des besoins futurs en eau dans le complexe sucrier de Borotou-Koro | 202 |
| 8.4.1. Évaluation des besoins en eau futurs en eau selon le modèle RACMO22T sur la période 2021-2060..... | 202 |
| 8.4.2. Évaluation des besoins en eau futurs selon le modèle RCA4 sur la période 2021-2060... .. | 203 |
| 8.4.3. Évaluation des besoins en eau futurs selon le modèle REMO2009 sur la période 2021-2060 | 203 |
| 8.5. Analyse de la disponibilité de l'eau dans le bassin versant du complexe sucrier de Borotou-Koro..... | 204 |
| 8.5.1. Analyse mensuelle de la disponibilité de l'eau sur la période 1970-2020..... | 204 |
| 8.5.2. Analyse décadaire de la disponibilité de l'eau en période de basse eau sur la période 1970-2020..... | 204 |
| 8.5.3. Disponibilité de l'eau dans le bassin versant à l'horizon 2060 | 205 |
| 8.5.3.1. Analyse de la disponibilité de l'eau selon le modèle RACMO22T | 205 |
| 8.5.3.2. Analyse de la disponibilité de l'eau selon le modèle RCA4..... | 206 |

| | |
|---|------------|
| 8.5.3.3. Analyse de la disponibilité de l'eau selon le modèle REMO2009 | 207 |
| 8.6. Adéquation entre la disponibilité et le besoin en eau dans le complexe sucrier de Borotou-Koro | 207 |
| 8.6.1. Analyse besoin-disponibilité en eau sur la période 2005 -2020 | 207 |
| 8.6.2. Analyse besoin-disponibilité en eau à l'horizon 2060..... | 208 |
| 8.6.2.1. Rapport entre les besoins et la disponibilité de l'eau selon le modèle RACMO22T . | 208 |
| 8.6.2.2. Rapport entre les besoins et la disponibilité de l'eau selon le modèle RCA4 | 209 |
| 8.6.2.3. Rapport entre les besoins et la disponibilité de l'eau selon le modèle REMO2009 ... | 210 |
| Discussion | 211 |
| Conclusion partielle..... | 215 |
| CONCLUSION | 217 |
| RÉFÉRENCES | 221 |
| ANNEXES | |
| PUBLICATION | |

DÉDICACE

À mes parents **KONATÉ Yacouba** et **FOFANA Karidja** ;

À mes frères **KONATÉ Tiémoko** et **KONATÉ Vassiriki** et mes sœurs
KONATÉ Mayélé et **KONATÉ Adja Macaniba** ;

À mon épouse **KONÉ Aïcha Christie** et nos enfants **Malika** et **Khalil** ;

Cette thèse est autant la vôtre que la mienne.

REMERCIEMENTS

Ce travail présente la contribution de plusieurs personnes, à l'égard desquels je souhaite exprimer ma plus profonde reconnaissance et gratitude. C'est avec plaisir que je m'adresse à eux à travers ces quelques lignes pour leur adresser mes sincères remerciements.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers l'ensemble du personnel de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG), sous la direction de Madame ADOHI KROU Viviane, Professeure Titulaire, pour avoir instauré un cadre propice à ma formation doctorale.

Je remercie Monsieur KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire et Directeur de l'Unité de Formation et de Recherche (UFR) Environnement d'avoir accepté d'héberger notre étude au sein de l'UFR.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de Monsieur KOUADIO Zilé Alex, Maître de Conférences et Directeur de cette thèse, pour la confiance qu'il m'a accordée sur ce sujet délicat, dont l'objectif est d'apporter des solutions aux problèmes complexes liés à l'eau dans la production sucrière. Je lui suis reconnaissant pour sa simplicité, sa disponibilité ainsi que pour ses conseils et orientations tout au long de ces années de recherche. Que ces quelques mots témoignent de l'immense estime que j'ai pour sa personne.

Je remercie Monsieur DIBI Brou, Professeur Titulaire et responsable du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) au sein de l'UFR Environnement de l'Université Jean Lorougnon Guédé, en lui exprimant ma reconnaissance pour m'avoir accueilli dans son laboratoire afin d'y mener mes travaux.

Je suis très reconnaissant envers Monsieur ASSOMA Tchimou Vincent, Maître de Conférences à l'Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY qui en plus d'avoir instruit cette thèse, a accepté d'être le rapporteur. Mes remerciements vont également à l'endroit de Monsieur FADIKA Vamoryba, Maître de Conférences à l'Université NANGUI ABROGOUA et Monsieur KOUASSI Kouakou Hervé, Maître de Conférences à l'Université Jean Lorougnon Guédé qui ont accepté d'évaluer ce travail en tant qu'examineur.

Je suis également reconnaissant à toute la direction de SUCRIVOIRE, mais plus particulièrement celle de l'Unité Agricole Intégrée de Borotou Koro (UAI-BK) avec à sa tête monsieur NIMBA Lain, Directeur de ce complexe. Ma reconnaissance particulière à Monsieur COFFI Eba Ernest, Directeur des plantations, pour sa simplicité, sa rigueur, ses précieux conseils, sa disponibilité et ses encouragements permanents tout le long de mes travaux de terrain. Mon passage à Borotou Koro m'a permis d'apprendre beaucoup et de mettre en pratiques mes acquis.

Je voudrais remercier aussi tous ces chefs de service ; Monsieur MAN Ya Guei Eric et Monsieur Konin Emile et leurs collaborateurs pour cet environnement de travail et leur sympathie à mon égard.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Monsieur SORO Tanina Drissa, Maître de Conférences, dont la disponibilité constante pour des critiques constructives et des orientations éclairées a grandement contribué au bon déroulement de mes travaux de thèse. En plus de tout cela à instruire de façon rigoureuse ce travail. Votre simplicité et votre engagement lors de mes diverses présentations ont constitué un soutien inestimable tout au long de ce parcours.

Je souhaite également adresser mes remerciements aux Professeurs KONAN Waidhet Arthur Brice et KONAN Séraphin, ainsi qu'aux Docteurs MANGUOI Oi Manguoi Jules, YAO Affoué Berthe épouse TOURE, SOMBO Abé Parfait et KOUASSI Kouakou Hervé, ainsi qu'à EBLIN Sampah Georges et ANOH Kouao Armand, tous Maîtres de Conférences à l'UFR Environnement. Mes remerciements vont également aux Docteurs KOUAME Yao Morton et BROU Loukou Alexis, Maîtres-Assistants, tous membres du Groupe de Recherche Eau Climat et Environnement pour leurs conseils avisés et leurs contributions significatives à travers la lecture et la correction de ce mémoire qui en ont substantiellement amélioré la qualité. Chers maîtres, je vous prie d'accepter mes vifs remerciements.

Je souhaite accorder une mention particulière à Docteur KOFFI Bérenger, Assistant à l'École Supérieure des Mines et de Géologie de l'Institut Polytechnique Houphouët Boigny de Yamoussoukro, pour ses précieux conseils et encouragements tout au long de cette thèse. Également aux Docteurs KOUAME Jean Olivier, Assistant à l'UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières de l'Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan ; OUATTARA Gningnéri Souleymane, Attaché de recherche à l'UFR Environnement à l'UJLoG ; ainsi qu'ADJI Beda Innocent, Assistant à l'UFR Agroforesterie de l'UJLoG. Aux Docteurs TOURE Fanraban Fabrice, KOKOBOU Kouassi Hervé, N'GUESSAN Konan Jean Yves, KOUASSI Amino Anne-Marie, OUEDE Gla Blaise, KOUASSI Kouassi Jean Michel, GOE Bi Antoine, AKAFFOU Franck, COULIBALY Wawogninlin Brice, KRE Gnon Edwige pour leurs contributions à l'élaboration de ce travail et leurs conseils et encouragements durant tout le long de cette thèse.

Je remercie également l'ensemble des étudiants du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) de l'Université Jean Lorougnon Guédé en particulier les doctorants KONAN Emile Desmond, TUO Yaraba, KONAN Barbara Sidoine et ZOURE Moussa pour leur sympathie et leurs contributions significatives à la réalisation de ce travail.

A Messieurs OUATTARA Aboudramane et ADINGRA Abo Jésus, j'adresse mes remerciements pour leur hospitalité durant toute cette période de stage. J'exprime également ma reconnaissance envers ADON Sapim Astromg, AFFIAN Cédric, KOUAME Franck Elysé et KOBENAN Davon Fabrice ainsi qu'à BOYO Hypolite pour leur disponibilité tout au long de ces années d'investigation sur le complexe sucrier.

J'exprime également ma gratitude à Messieurs CISSE Issiaka et TOURE Kassoum pour leurs conseils éclairés dans l'élaboration de ce travail.

À mes camarades de la promotion 2008-2009 URES Daloa : KONAN Koffi David, YAPO Assémian Sylvestre, KONAN Kouakou Ferdinand, DOH Arnold Ruffin et DIOMANDE Siaka, votre soutien indéfectible a été déterminant dans la réussite de ce travail. Aussi, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes compagnons DIOMANDE Mamadou, KAMIN Sarah Espérance et MEMEL Danielle. Merci infiniment pour votre apport moral inestimable à ce projet.

Je remercie sincèrement tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué, d'une manière ou d'une autre, à la réalisation de cette thèse et que je n'ai pas mentionnés ici ; votre soutien m'a été précieux.

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

| | |
|-----------|---|
| CGIAR | : Consultative Group on International Agricultural Research |
| CMD | : Coefficient Mensuel de Débit |
| CNRA | : Centre National de Recherche Agronomique |
| CORDEX | : Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment |
| CPS | : Cumul de Précipitation Saisonnière |
| DCE | : Débits Caractéristiques d'Etiage |
| DHH | : Direction de l'Hydraulique Humaine |
| DSP | : Début de la Saison des Pluies |
| EMD | : Ecart Moyen du Débit |
| ESRI | : Environmental System Research Institute |
| ETP | : Evapotranspiration Potentielle |
| ETR | : Evapotranspiration Réelle |
| FAO | : Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) |
| FSP | : Fin de la Saison des Pluies |
| GES | : Gaz à Effet de Serre |
| GIEC | : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat |
| HMP | : Hauteur journalière Moyenne de Précipitation |
| IRD | : Institut de Recherche pour le Développement |
| Kc | : Coefficient Cultural |
| LCM | : Land Change Modeler |
| LSP | : Longueur de la Saison des Pluies |
| LSTE | : Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement |
| LUCC | : Loni Urban Multi State Credit |
| MCR | : Modèle Climatique Régional |
| MINAGRA | : Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural |
| MLPNN | : Multi-Layer Perceptron Neural Network |
| MNT | : Modèle Numérique de Terrain |
| NDVI | : Indice de Végétation par Différence Normalisé |
| OCS | : Occupation du Sol |
| OLI-TIRS | : Operational Land Imager-Thermal Infrared Sensor |
| OMM | : Organisation Météorologique Mondiale |
| PIB | : Produit Intérieur Brut |
| PIR | : Proche Infra-rouge |
| PNUD | : Programme des Nations Unies pour le Développement |
| QMNA | : Débit Moyen Mensuel |
| RCP | : Representative Concentration Pathways |
| RGPH | : Recensement Général de la Population et de l'Habitat |
| SDI | : Indice de Sécheresse des Débits |
| SEA | : Service d'Etude Agronomique |
| SIFCA | : Société Immobilière et Financière de la Côte Africaine |
| SIG | : Système d'Information Géographique |
| SODESUCRE | : Société d'État pour le développement des plantations de canne à sucre en Côte d'Ivoire |
| SODEXAM | : Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique |

| | |
|----------|--|
| SPEI | : Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (Indice Normalisé des Précipitations et de l'Evapotranspiration) |
| SPI | : Standardized Precipitation Index (Indice Standardisé de Précipitation) |
| Sucaf-CI | : Sucrerie Africaine- Côte d'Ivoire |
| TM/ETM+ | : Thematic Mapper/Enhanced Thematic Mapper Plus |
| UAIBK | : Unité Agricole Intégrée de Borotou-Koro |
| UE | : Union Européenne |
| UFR | : Unité de Formation et de Recherche |
| UJLoG | : Université Jean Lorougnon Guédé |
| VCN | : Débits Moyens Minimums Journaliers |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|-----|
| Tableau I : Evolution de la population du complexe sucrier de Borotou Koro | 14 |
| Tableau II : Description synoptique des données des stations climatiques retenues pour l'étude..... | 41 |
| Tableau III : Modèles climatiques et leurs origines..... | 42 |
| Tableau IV : Description synoptique des données des stations hydrométriques dans le bassin versant | 43 |
| Tableau V : Caractéristiques des images satellitaires | 44 |
| Tableau VI : Description des bandes des images satellitaires | 44 |
| Tableau VII : Classification des intensités de sécheresse selon les indices (Vicente-Serrano et al., 2010)..... | 55 |
| Tableau VIII : Classification de la sécheresse hydrologique (Nalbantis & Tsakiris, 2009)..... | 58 |
| Tableau IX : Classes d'occupation du sol et leurs caractéristiques..... | 63 |
| Tableau X : Paramètres et constantes du modèle CEQUEAU (Morin & Paturel, 2007)..... | 74 |
| Tableau XI : Tableau récapitulatif de la variation des dates de début de la pluie aux stations climatiques étudiées sur le bassin versant. | 84 |
| Tableau XII : Tableau récapitulatif de la variation des dates de fin de la saison des pluies aux stations climatiques étudiées sur le bassin versant | 85 |
| Tableau XIII : Tableau récapitulatif de la variation des longueurs de la saison des pluies aux stations climatiques étudiées sur le bassin versant | 86 |
| Tableau XIV : Tableau récapitulatif de la variation du nombre de jour de pluie aux stations climatiques étudiées sur le bassin versant | 87 |
| Tableau XV : Tableau récapitulatif de la variation du cumul de précipitation saisonnier aux stations climatiques étudiées sur le bassin versant | 88 |
| Tableau XVI : Tableau récapitulatif de la variation des hauteurs journalières moyennes de pluie aux stations climatiques étudiées sur le bassin versant | 90 |
| Tableau XVII : Tableau récapitulatif de la variation des séquences sèches saisonnières aux stations climatiques étudiées sur le bassin versant | 91 |
| Tableau XVIII : Récapitulatif des tendances des paramètres agroclimatiques | 97 |
| Tableau XIX : Intensité, fréquence et durée des séquences météorologiques | 107 |
| Tableau XX : Taux d'erreurs des précipitations et des températures moyennes annuelles simulées à la station de Borotou Koro | 108 |
| Tableau XXI : Taux d'erreurs des précipitations et des températures moyennes annuelles simulées à la station d'Odienné..... | 108 |
| Tableau XXII : Taux d'erreurs des précipitations et des températures moyennes annuelles simulées à la station de Touba | 109 |
| Tableau XXIII : Taux d'erreurs des précipitations et de températures moyennes annuelles simulées à la station de Beyla | 109 |
| Tableau XXIV : Tendances dans la chronique des débits mensuels à la station de Sorotona (1970-2020)..... | 127 |
| Tableau XXV : Matrice de confusion de la classification de l'image de 1986..... | 136 |
| Tableau XXVI : Matrice de confusion de la classification de l'image de 2003 | 137 |
| Tableau XXVII : Matrice de confusion de la classification de l'image de 2020..... | 138 |
| Tableau XXVIII : Superficie des classes d'occupation du sol du bassin versant en 1986 | 139 |
| Tableau XXIX : Superficie des classes d'occupation du sol du bassin versant en 2003 | 140 |
| Tableau XXX : Superficie des classes d'occupation du sol du bassin versant en 2020..... | 142 |
| Tableau XXXI : Taux et vitesses de variation des superficies des classes d'OCS du bassin versant entre 1986 et 2003 | 143 |

| | |
|---|-----|
| Tableau XXXII : Matrice de transition entre 1986 et 2003 en hectare..... | 145 |
| Tableau XXXIII : Taux et vitesses d'évolution des superficies entre 2003 et 2020 | 146 |
| Tableau XXXIV : Matrice de transition entre 2003 et 2020 en hectare | 148 |
| Tableau XXXV : Taux et vitesses d'évolution des superficies des classes d'occupation du sol dans le bassin versant entre 1986 et 2020..... | 149 |
| Tableau XXXVI : Coefficients de Cramer's V des variables explicatives | 151 |
| Tableau XXXVII : Sous modèles et leurs transitions potentiels retenus | 152 |
| Tableau XXXVIII : Taux d'exactitude des cartes de potentiel de transition pour chaque type de transition par sous-modèle..... | 153 |
| Tableau XXXIX : Superficie des différentes classes d'occupation du sol observées et simulées en 2020..... | 155 |
| Tableau XL : Statistiques des superficies des classe d'occupation du sol (OCS) projetées en 2034 et 2054..... | 157 |
| Tableau XLI : Caractéristiques des stations hydrométéorologiques | 158 |
| Tableau XLII : Précisions des surfaces du bassin versant après préparation des données de carreaux | 159 |
| Tableau XLIII : Valeurs optimales des paramètres de simulation du modèle CEQUEAU | 160 |
| Tableau XLIV : Synthèse des critères numériques de calage et de validation | 161 |
| Tableau XLV : Lamme d'eau mensuelle observées et calculées de 1984 à 1986 (Calage)..... | 161 |
| Tableau XLVI : Intensité des séquences de sécheresse hydrologique futures (2021 à 2060) | 179 |
| Tableau XLVII : Répartition des périodes de basses eaux (BE) et de hautes eaux (HE) sur la période 2021-2060..... | 180 |
| Tableau XLVIII : Évolution des besoins en eau de la canne en fonction des étapes phénologiques | 190 |
| Tableau XLIX : Besoins de la canne en fonction de la date de planting ou de repousse | 191 |
| Tableau L : Taux de variation des volumes d'eau par campagne | 194 |
| Tableau LI : Synthèse des besoins futurs en eau par campagne agricole | 202 |
| Tableau LII : Estimation des besoins futurs en eau sur la période 2021-2060 selon le modèle RACMO22T..... | 202 |
| Tableau LIII : Estimation des besoins futurs en eau sur la période 2021-2060 selon le modèle RCA4 | 203 |
| Tableau LIV : Estimation des besoins futurs en eau sur la période 2021-2060 selon le modèle REMO2009 | 204 |
| Tableau LV : Disponibilité en eau dans le bassin versant sur la période 1970-2020 | 204 |
| Tableau LVI : Disponibilité décadaire de l'eau dans le bassin versant en période de basse eau sur la période 1970-2020..... | 205 |
| Tableau LVII : Estimation de la disponibilité en eau dans le bassin versant selon le modèle RACMO22T..... | 206 |
| Tableau LVIII : Estimation de la disponibilité en eau dans le bassin versant selon le modèle RCA4 | 206 |
| Tableau LIX : Estimation de la disponibilité en eau dans le bassin versant selon le modèle REMO2009 | 207 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Localisation de la zone d'étude | 6 |
| Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la station de Borotou Koro sur la période 2001-2020..... | 7 |
| Figure 3 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona..... | 8 |
| Figure 4 : Carte du relief du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona..... | 9 |
| Figure 5 : Carte géologique du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona..... | 10 |
| Figure 6 : Carte de la végétation du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona | 11 |
| Figure 7 : Organisation générale de Sucrivoire (Hamza & Oumar, 2021)..... | 12 |
| Figure 8 : Carte de l'Unité Agricole Intégrée de Borotou-Koro | 13 |
| Figure 9 : Centres d'action atmosphérique..... | 17 |
| Figure 10 : Déplacement vers le Sud des isohyètes sur les périodes 1951-1969 et 1970-1989 | 19 |
| Figure 11 : Evolution de la production agricole par habitant et par région entre 1961 et 2002..... | 25 |
| Figure 12 : Système racinaire d'une jeune plante..... | 30 |
| Figure 13 : Différents types de racine de la canne à sucre | 31 |
| Figure 14 : Morceau de tige de canne à sucre | 32 |
| Figure 15 : Feuille de la canne à sucre | 33 |
| Figure 16 : Carte de la répartition spatiale des stations météorologiques dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona..... | 41 |
| Figure 17 : Carte de la répartition des stations hydrométriques dans le bassin versant du fleuves Sassandra à Sorotona..... | 43 |
| Figure 18 : Graphe de détermination des saisons culturales selon Franquin (1973)..... | 53 |
| Figure 19 : Organigramme méthodologique d'établissement des cartes d'occupation du sol | 61 |
| Figure 20 : Organigramme de prédiction de l'occupation du sol à l'aide du Modèle LMC. | 66 |
| Figure 21 : Partage des carreaux entiers en carreaux partiels (Morin & Paturel, 2007)..... | 71 |
| Figure 22 : Schématisation du transfert de l'eau d'une maille à l'autre (Morin & Paturel, 2007)..... | 72 |
| Figure 23 : Programme de détermination des besoins en eau de la canne à sucre. | 80 |
| Figure 24 : Évolution des dates de début de la saison des pluies à la station de Borotou-Koro (a) ; Odienné (b) ; Touba (c) et Beyla (d) au cours de la période 1970-2020..... | 84 |
| Figure 25 : Évolution des dates de fin de la saison des pluies à la station de Borotou-Koro (a) ; Odienné (b) ; Touba (c) et Beyla (d) au cours de la période 1970-2020..... | 85 |
| Figure 26 : Évolution des longueurs de la saison des pluies à la station de Borotou-Koro (a) ; Odienné (b) ; Touba (c) et Beyla (d) au cours de la période 1970-2020. | 86 |
| Figure 27 : Évolution des nombres de jours de pluie à la station de Borotou-Koro (a) ; Odienné (b) ; Touba (c) et Beyla (d) au cours de la période 1970-2020. | 87 |
| Figure 28 : Évolution des cumuls de précipitation saisonniers à la station de Borotou-Koro (a) ; Odienné (b) ; Touba (c) et Beyla (d) au cours de la période 1970-2020..... | 89 |
| Figure 29 : Évolution des hauteurs journalières de précipitation à la station de Borotou-Koro (a) ; Odienné (b) ; Touba (c) et Beyla (d) au cours de la période 1970-2020..... | 90 |
| Figure 30 : Évolution des séquences sèches saisonnières à la station de Borotou-Koro (a) ; Odienné (b) ; Touba (c) et Beyla (d) au cours de la période 1970-2020. | 91 |
| Figure 31 : Évolution comparée de la pluviométrie et des rendements de canne à sucre par campagne agricole sur la période 2005-2020. | 92 |
| Figure 32 : Corrélation entre variables agroclimatiques et valeurs agronomiques de la canne à sucre au premier trimestre de l'année..... | 93 |
| Figure 33 : Corrélation entre variables agroclimatiques et valeurs agronomiques de la canne à sucre au deuxième trimestre de l'année..... | 94 |

| | |
|--|-----|
| Figure 34: Corrélation entre variables agroclimatiques et valeurs agronomiques de la canne à sucre au troisième trimestre de l'année | 95 |
| Figure 35: Corrélation entre variables agroclimatiques et valeurs agronomiques de la canne à sucre au quatrième trimestre de l'année | 96 |
| Figure 36 : Date des ruptures dans les chroniques agroclimatiques des stations étudiées dans le bassin versant | 99 |
| Figure 37 : Calendrier cultural selon les données climatiques dans le bassin versant | 100 |
| Figure 38 : Calendrier cultural adapté de la culture de canne à sucre dans le bassin versant..... | 102 |
| Figure 39 : Évolution des isohyètes dans le bassin versant par décennie de 1970 à 2020 | 104 |
| Figure 40 : Évolution des SPEI à la station de Borotou-Koro (a) ; Odienné (b) ; Touba (c) et Beyla (d) au cours de la période 1970-2020..... | 106 |
| Figure 41 : Évolution des pluies avant et après la correction des biais aux stations du bassin versant sur la période 1970-2005..... | 110 |
| Figure 42: Évolution des températures avant et après la correction des biais aux stations du bassin versant sur la période 1970-2005. | 111 |
| Figure 43: Évolution des précipitations mensuelles futures dans le bassin versant selon les modèles climatiques sur la période 2021-2060..... | 112 |
| Figure 44 : Évolution des températures mensuelles futures dans le bassin versant selon les modèles climatiques sur la période 2021-2060..... | 112 |
| Figure 45 : Évolution des coefficients d'hydraulicité annuels à la station de Sorotona sur la période 1970-2020..... | 117 |
| Figure 46 : Évolution du coefficient de variation des écoulements à la station hydrométrique de Sorotona sur la période 1970-2020..... | 118 |
| Figure 47 : Évolution annuelle comparée de la pluie et des lames d'eau écoulées dans le bassin versant sur la période 1970-2020 | 119 |
| Figure 48 : Évolution mensuelle comparée de la pluie et des lames d'eau écoulées dans le bassin versant sur la période 1970-2020 | 119 |
| Figure 49 : Corrélation annuelle entre la pluie et les lames d'eau écoulées dans le bassin versant sur la période 1970-2020..... | 120 |
| Figure 50 : Évolution annuelle des pluies, des lames d'eau écoulée et du déficit d'écoulement dans le bassin versant de 1970 à 2020..... | 121 |
| Figure 51: Évolution mensuelle des pluies, des lames d'eau écoulée et du déficit d'écoulement de 1970 à 2020 | 122 |
| Figure 52 : Évolution des modules annuels d'écoulements dans le bassin versant (1970-2020)..... | 122 |
| Figure 53 : Évolution des écoulements maxima annuels dans le bassin versant sur la période 1970-2020..... | 123 |
| Figure 54 : Évolution des minimas annuels d'écoulements dans le bassin versant sur la période 1970-2020..... | 124 |
| Figure 55 : Évolution des écoulements mensuels maximaux le bassin versant sur la période 1970-2020..... | 124 |
| Figure 56 : Évolution des écoulements mensuels minimaux le bassin versant sur la période 1970-2020 | 125 |
| Figure 57 : Régime hydrologique des écoulements dans le bassin versant du fleuveassandra à Sorotona sur la période 1970-2020..... | 126 |
| Figure 58 : Suivi des dates de début de rupture dans les séries de débits à la station de Sorotona sur la période 1970-2020..... | 129 |
| Figure 59 : Évolution des débits journaliers à la station de Sorotona sur la période 1970-2020 | 130 |
| Figure 60 : Évolution des débits classés à la station de Sorotona sur la période d'étude 1970-2020 | 131 |

| | |
|--|-----|
| Figure 61 : Histogramme de la fréquence des débits journaliers en fonction des classes de débit à la station de Sorotona sur la période 1970-2020. | 131 |
| Figure 62 : Évolution des débits caractéristiques d'étiage à la station de Sorotona sur la période 1970-2020. | 132 |
| Figure 63 : Évolution des débits moyens mensuels minimaux annuels (QMNA) à la station de Sorotona sur la période 1970-2020. | 133 |
| Figure 64 : Évolution des indices de sévérité d'étiage à la station de Sorotona sur la période 1970-2020. | 133 |
| Figure 65 : Évolution des débits moyens minimums journaliers (VCN _d) à la station de Sorotona sur la période 1970-2020. | 134 |
| Figure 66 : Évolution de la durée des débits d'étiage dans le bassin versant sur la période 1970-2020. | 135 |
| Figure 67 : Carte d'occupation du sol du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona en 1986 ... | 138 |
| Figure 68 : Répartition des classes d'occupation du sol du bassin versant en 1986 | 139 |
| Figure 69 : Carte d'occupation du sol du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona en 2003 ... | 140 |
| Figure 70 : Répartition des classes d'occupation du sol du bassin versant en 2003. | 141 |
| Figure 71 : Carte d'occupation du sol du bassin versant en 2020. | 141 |
| Figure 72 : Répartition des classes d'occupation du sol du bassin versant en 2020. | 142 |
| Figure 73 : Carte des changements d'occupation du sol du bassin versant entre 1986-2003. | 144 |
| Figure 74 : Carte des changements d'occupation du sol du bassin versant entre 2003 et 2020 | 147 |
| Figure 75 : Évolution des superficies des classes d'occupation du sol entre 1986 et 2020. | 148 |
| Figure 76 : Gains et pertes des superficies d'occupation du sol sur le bassin versant entre 1986 et 2003 | 150 |
| Figure 77 : Contributions du changement net des catégories de l'occupation des sols. | 150 |
| Figure 78 : Variables explicatives utilisées pour la modélisation du sol dans le bassin versant. | 151 |
| Figure 79 : Cartes des potentiels de transition vers les classes de cultures, d'habitats et forêt. | 152 |
| Figure 80 : Comparaison entre la carte d'occupation du sol observée (a) et la carte simulée (b) pour l'année 2020. | 154 |
| Figure 81 : Cartes prédictives de l'occupation du sol du bassin versant de 2034 (a) et 2054 (b). | 156 |
| Figure 82 : Discrétisation du bassin versant en carreaux entiers et partiels | 158 |
| Figure 83 : Superposition de la grille de discrétisation aux cartes d'occupation du sol du bassin versant | 159 |
| Figure 84 : Hydrogrammes journaliers interannuels pour la période de calage (1984-1986) | 162 |
| Figure 85 : Évolution des débits journaliers cumulés sur la période de calage (1984-1986) ... | 162 |
| Figure 86 : Hydrogrammes journaliers interannuels à la validation 1 (2001-2005) | 163 |
| Figure 87 : Hydrogrammes journaliers interannuels à la validation 2 (2017-2020) | 163 |
| Figure 88 : Histogramme interannuelle des débits moyens mensuels calculés et observés sur la période 2001-2005 (a) et 2017-2020 (b). | 164 |
| Figure 89 : Hydrogramme des débits moyens journaliers observés avec l'occupation du sol de 1986 | 164 |
| Figure 90 : Hydrogramme des débits moyens journaliers observés avec l'occupation du sol de 2003 | 165 |
| Figure 91 : Hydrogrammes des débits moyens journaliers observés avec l'OCS de 2020 | 166 |
| Figure 92 : Hydrogrammes des débits moyens journaliers observés avec l'occupation du sol de 2034 (a) et 2054 (b) | 167 |
| Figure 93 : Hydrogrammes des débits moyens mensuels des OCS en 1986, 2003, 2020, 2034 et 2054 | 168 |

| | |
|---|-----|
| Figure 94 : Evolution des écoulements mensuels aux horizons 2030 et 2050 selon les modèles climatiques RACMO22T, RCA4 et REMO2009 | 170 |
| Figure 95 : Hydrogrammes des écoulements mensuels futurs avec la combinaison du changement climatique et de l'OCS 2034 selon les modèles climatiques RACMO22T ; RCA4 et REMO2009 ... | 173 |
| Figure 96 : Hydrogrammes des écoulements mensuels futurs avec la combinaison du changement climatique et de l'OCS 2054 selon les modèles climatiques RACMO22T, RCA4 et REMO2009 | 176 |
| Figure 97 : Evolution de la sécheresse hydrologique de 2021 à 2060 | 178 |
| Figure 98 : Fréquence des classes d'intensité de sécheresse hydrologique future | 179 |
| Figure 99 : Évolution mensuelle de l'ETP dans le bassin versant de 2000 à 2020 | 187 |
| Figure 100 : Évolution annuelle de l'ETP dans le bassin versant de 2000 à 2020..... | 188 |
| Figure 101 : Variation du coefficient cultural mensuel de la canne à sucre..... | 189 |
| Figure 102 : Évolution de la consommation mensuelle d'eau par secteur agricole sur la période de 2012-2021..... | 192 |
| Figure 103 : Évolution de la consommation mensuelle en eau d'irrigation par campagne de 2012 à 2020..... | 193 |
| Figure 104 : Évolution de la consommation globale en eau d'irrigation par campagne de 2012 à 2020 | 193 |
| Figure 105 : Évolution des pluies et ETP mensuelles selon les modèles climatiques pour la période 2021-2060..... | 195 |
| Figure 106 : Évolution mensuelle des besoins en eau selon le modèle RCA4 sur la période 2021-2060. | 196 |
| Figure 107 : Évolution mensuelle des besoins futurs en eau selon le modèle REMO2009 sur la période 2021-2060..... | 197 |
| Figure 108 : Évolution mensuelle des besoins futurs en eau selon le modèle RACMO22T sur la période 2021-2060..... | 198 |
| Figure 109 : Évolution des besoins futurs en eau par campagne selon le modèle RCA4 sur la période 2021-2060..... | 199 |
| Figure 110 : Évolution des besoins futurs en eau par campagne selon le modèle REMO2009 sur la période 2021-2060..... | 200 |
| Figure 111 : Évolution des besoins futurs en eau par campagne selon le modèle RACMO22T sur la période 2021-2060..... | 201 |
| Figure 112 : Comparaison besoin et disponibilité de l'eau dans le complexe sucrier de Borotou Koro sur la période 2005-2020..... | 208 |
| Figure 113 : Rapport besoins et disponibilité en eau selon les scénarios RCP4.5 (a) et RCP8.5 (b) du modèle RACMO22T | 209 |
| Figure 114 : Rapport besoins et disponibilité en eau selon les scénarios RCP4.5 (a) et RCP8.5 (b) du modèle RCA4..... | 210 |
| Figure 115 : Rapport besoins et disponibilité en eau selon les scénarios RCP4.5 (a) et RCP8.5 (b) du modèle REMO2009..... | 211 |

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Débits caractéristiques d'étiage en m^3/s dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

Annexe 2 : Débits moyens journaliers sur la période de calage 1984-1986 (m^3/s)

Annexe 3 : Débits moyens journaliers sur la première période de validation 2001-2005 (m^3/s)

Annexe 4 : Débits moyens journaliers sur la première période de validation 2017-2020 (m^3/s)

Annexe 5 : Débits simulés par le modèle RCA4 avec la carte d'occupation du sol 2034 (2021-2060) à la station de Sorotona (m^3/s)

Annexe 6 : Débits simulés par le modèle RCA4 avec la carte d'occupation du sol 2054 (2021-2060) à la station de Sorotona (m^3/s)

Annexe 7 : Débits simulés par le modèle REMO2009 avec la carte d'occupation du sol 2034 (2021-2060) à la station de Sorotona (m^3/s)

Annexe 8 : Débits simulés par le modèle REMO2009 avec la carte d'occupation du sol 2054 (2021-2060) à la station de Sorotona

Annexe 9 : Débits simulés par le modèle RACMO22T avec la carte d'occupation du sol 2054 (2021-2060) à la station de Sorotona (m^3/s)

Annexe 10 : Volume d'eau mensuel pompé par campagne sur la période 2012-2020 ($m^3/mois$)

Annexe 11 : Détermination des besoins en eau d'irrigation des parcelles irriguées selon le modèle RACMO22T sur la période 2024-2060 ($m^3/mois$)

Annexe 12 : Détermination des besoins en eau d'irrigation des parcelles assistées selon le modèle RACMO22T sur la période 2024-2060 ($m^3/mois$)

Annexe 13 : Détermination des besoins en eau d'irrigation des parcelles irriguées selon le modèle RCA4 sur la période 2024-2060 ($m^3/mois$)

Annexe 14 : Détermination des besoins en eau d'irrigation des parcelles assistées selon le modèle RCA4 sur la période 2024-2060 ($m^3/mois$)

Annexe 15 : Détermination des besoins en eau d'irrigation des parcelles irriguées selon le modèle REMO2009 sur la période 2024-2060 ($m^3/mois$)

Annexe 16 : Détermination des besoins en eau d'irrigation des parcelles assistées selon le modèle REMO2009 sur la période 2024-2060 ($m^3/mois$)

Annexe 17 : Détermination des besoins en eau d'irrigation des parcelles assistées selon le modèle REMO2009 sur la période 2024-2060 ($m^3/mois$)

INTRODUCTION

La Côte d'Ivoire a connu pendant les décennies 1960-1980 un développement appelé « le miracle ivoirien ». Ce miracle ivoirien a reposé sur l'agriculture plus précisément le binôme café-cacao. L'agriculture a été le moteur de la croissance de la plupart des services et du commerce en Côte d'Ivoire (Aubertin, 1983). Jusqu'à la fin des années 1970, les cultures commerciales étaient majoritairement dominées par le café et le cacao pour la zone forestière. La chute de leurs cours mondiaux a relancé le besoin de diversifier les sources de revenus. Ce souci de développement amène les pays en voie de développement à s'orienter vers l'industrie agro-alimentaire. La mise en œuvre de cette perspective a vu la création des complexes sucriers ivoiriens qui est le résultat de la volonté politique datant des années 1970. Ainsi, six complexes sucriers ont été créés dont quatre existent encore aujourd'hui, au nombre desquels figure celui de Borotou-Koro dans le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. En plus d'un souci de développement, la création des industries agro-alimentaires avait aussi pour but de garantir la sécurité alimentaire en Côte d'Ivoire. En effet, du fait de la croissance rapide des populations, la consommation du sucre connaît une hausse après le riz, l'igname, le manioc et la banane plantain (Kouamé *et al.*, 2009). La demande locale de sucre est supérieure à la production nationale et la consommation globale est de plus en plus croissante aujourd'hui.

Le secteur sucrier de la Côte d'Ivoire se divise en deux sous-secteurs distincts. Il s'agit du secteur de la culture industrielle irriguée de canne à sucre, exercée par des sociétés sucrières et la culture villageoise pluviale de cette même plante, pratiquée par de petits exploitants. Le secteur sucrier ivoirien s'étend sur une superficie totale approximative de 30 000 hectares, dont 5 000 sont dédiés à la culture villageoise. La production annuelle moyenne totale en sucre s'élève à environ 180 000 tonnes, alors que les besoins minimums sont estimés à au moins 200 000 tonnes. Le rendement moyen dans le cadre de la culture industrielle est d'environ 78 tonnes par hectare, tandis qu'il n'atteint que 40 tonnes par hectare pour la culture villageoise. Cette disparité dans les niveaux de rendement peut être attribuée, entre autres facteurs, au faible encadrement dont bénéficient les producteurs villageois contrairement à la culture industrielle ainsi qu'à l'insuffisante performance des variétés cultivées tant en milieu industriel (irrigué) qu'en milieu villageois pluvial.

Pour combler ce déficit et pérenniser la production du sucre, les compagnies sucrières ont opté pour une extension de leurs superficies qui occupent déjà 25 400 ha sur un domaine foncier de 61 400 ha (Kouamé *et al.*, 2009). A cela s'ajoute le développement des plantations villageoises et la redynamisation de la recherche agronomique, à travers l'optimisation des pratiques culturales, la culture de variétés performantes et la réduction de la durée de sélection (Péné & Koulibaly, 2007).

Mais face à cet élan des décideurs industriels et politiques, la filière de l'agro-alimentaire fait face à l'épineuse phénomène du changement climatique. En effet, la connaissance à l'avance de la qualité de la saison agricole (quantité de pluie et sa distribution) permet aux acteurs du monde agricole de planifier et d'utiliser rationnellement les ressources en eau. C'est pourquoi la prévision saisonnière des pluies est l'une des mesures de parade face aux effets des changements climatiques. Plusieurs études menées en milieu agricole (Ben Mohamed *et al.*, 2002 ; Ingram *et al.*, 2002 ; Barima *et al.*, 2009) montrent que les agriculteurs expriment un réel intérêt à recevoir une prévision saisonnière des pluies. Les agriculteurs et décideurs sont aussi intéressés par les caractéristiques agroclimatiques telles que les dates de démarrage et de fin des saisons, la distribution des séquences pluvieuses ou sèches au cours des saisons agricoles. Pour répondre aux préoccupations des acteurs du monde agricole en Côte d'Ivoire, des recherches agroclimatiques de ce type sont réalisées afin d'éviter à ceux-ci de voir leurs efforts réduits à néant. C'est dans ce contexte que ce travail de recherche intitulé : « **Mobilisation des ressources en eau de surface dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona pour la production de la canne à sucre : cas du complexe sucrier de Borotou-Koro (Nord-Ouest, Côte d'Ivoire)** » a été initié par le Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) de l'Université Jean Lorougnon Guédé.

L'objectif principal de ce travail de recherche est de quantifier les ressources en eau de surface pour satisfaire les besoins à court et moyen terme dans l'exploitation agricole de Borotou Koro afin de garantir la production de sucre.

De façon spécifique, il s'agit de :

- caractériser les paramètres agroclimatiques dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona ;
- évaluer la disponibilité de l'eau dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona ;
- établir le rapport entre la demande et la disponibilité en eau dans l'exploitation agricole de Borotou Koro.

Le présent mémoire est subdivisé en trois grandes parties qui comprennent chacune des chapitres. La première partie qui présente les généralités, contient les chapitres 1 et 2, portant respectivement sur la caractérisation physique du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona et l'état des connaissances sur la variabilité climatique et l'agriculture en Afrique de l'Ouest. La deuxième partie présente le matériel et les méthodes, illustré pour les chapitres 3 et 4. Ainsi le chapitre 3, porte sur les données et les logiciels indispensables à la réalisation de cette étude et le chapitre 4, présente les méthodologies d'étude appliquées pour répondre à la problématique

abordée. La troisième partie est consacrée à la présentation des résultats obtenus et leur discussion. Elle inclut, les chapitres 5, 6 et 7. Le chapitre 5 présente les résultats de l'étude de la caractérisation des paramètres agroclimatiques dans le bassin versant et leur impact sur la culture de canne à sucre et les projections climatiques futures. Le chapitre 6 présente les résultats de l'évaluation de la disponibilité de l'eau dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona. Le chapitre 7 illustre les résultats du rapport entre la demande et la disponibilité en eau dans l'exploitation agricole de Borotou-Koro. Ce travail se termine par une conclusion générale qui dresse le bilan des résultats acquis au cours de l'étude ainsi que les recommandations et les perspectives de recherche qu'elle suscite.

PARTIE I : GÉNÉRALITÉS

CHAPITRE 1: CARACTÉRISTIQUES DU BASSIN VERSANT DU FLEUVE SASSANDRA À SOROTONA ET DU COMPLEXE SUCRIER DE BOROTOU-KORO

1.1. Localisation du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

Le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona est situé au Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire, entre les longitudes 6°53' et 8°45' Ouest et les latitudes 8°05 et 9°43' Nord (Figure 1). Le bassin versant couvre une superficie de 18 581 km². Ce bassin versant est une zone transfrontalière entre la Côte d'Ivoire et la Guinée. En Côte d'Ivoire, il couvre les régions du Denguélé, du Bafing et du Worofla. En Guinée, il couvre la région de Zérékoré dans le département de Beyla. Le bassin versant du Sassandra à Sorotona est aussi appelé bassin du Haut Sassandra (Traoré *et al.*, 1995).

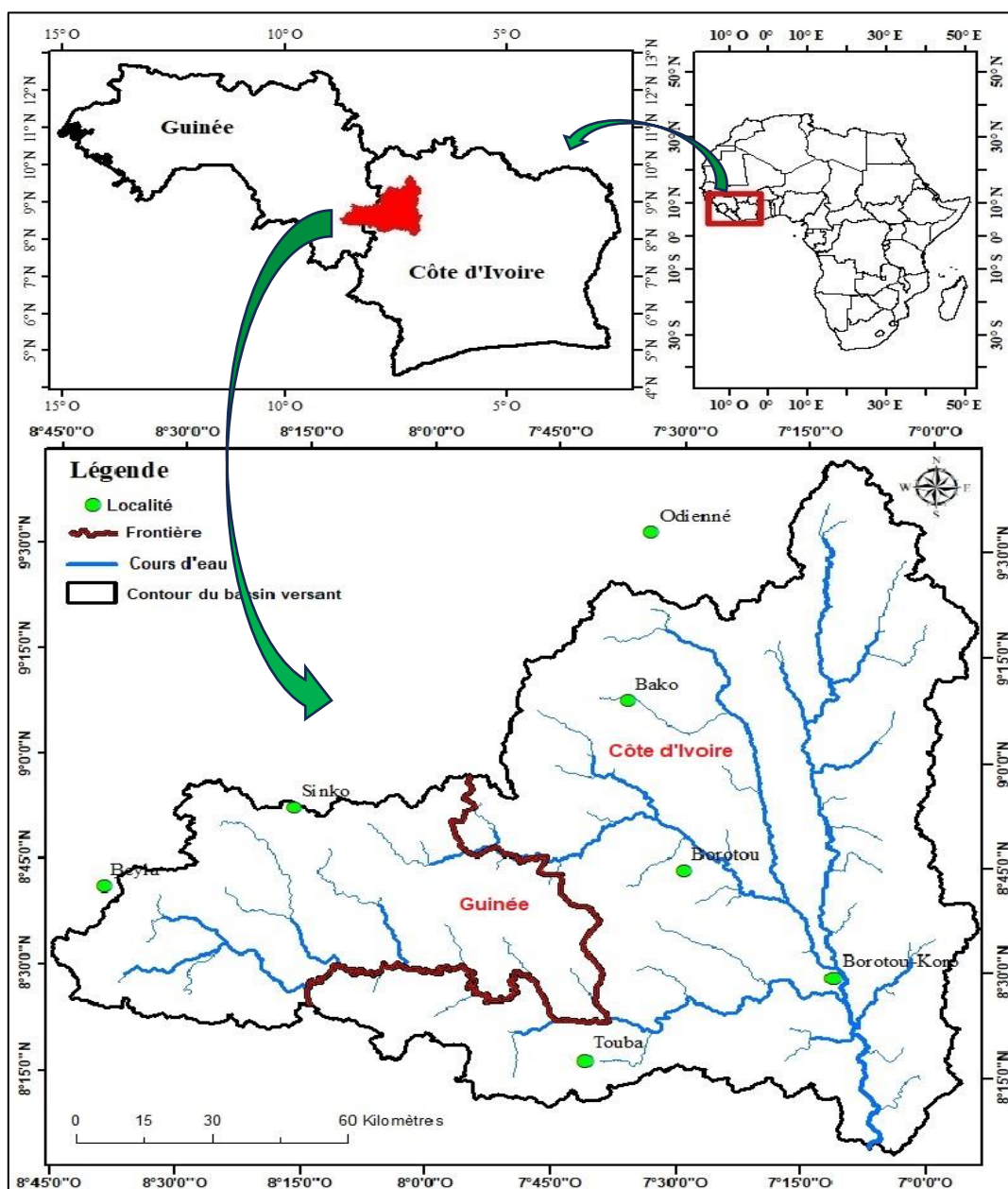


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

1.2. Caractéristiques hydroclimatiques du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

1.2.1. Climat dans le bassin versant

D'une façon générale, l'ensemble du bassin versant est influencé par un climat de type tropical humide caractérisé par deux saisons (Figure 2) : une saison sèche et une saison des pluies. La saison sèche s'étend de novembre à mars avec des précipitations moyennes mensuelles qui varient entre 10 à 54 mm sur la période 2001-2020. Par contre, la saison pluvieuse s'étend d'avril à octobre avec des précipitations moyennes mensuelles variant de 102 à 258 mm sur la même période. Le bassin versant enregistre des températures moyennes mensuelles qui oscillent entre 25 et 39 °C. Les températures minimales sont enregistrées pendant le mois de janvier, alors que les températures maximales sont enregistrées au mois de mars.

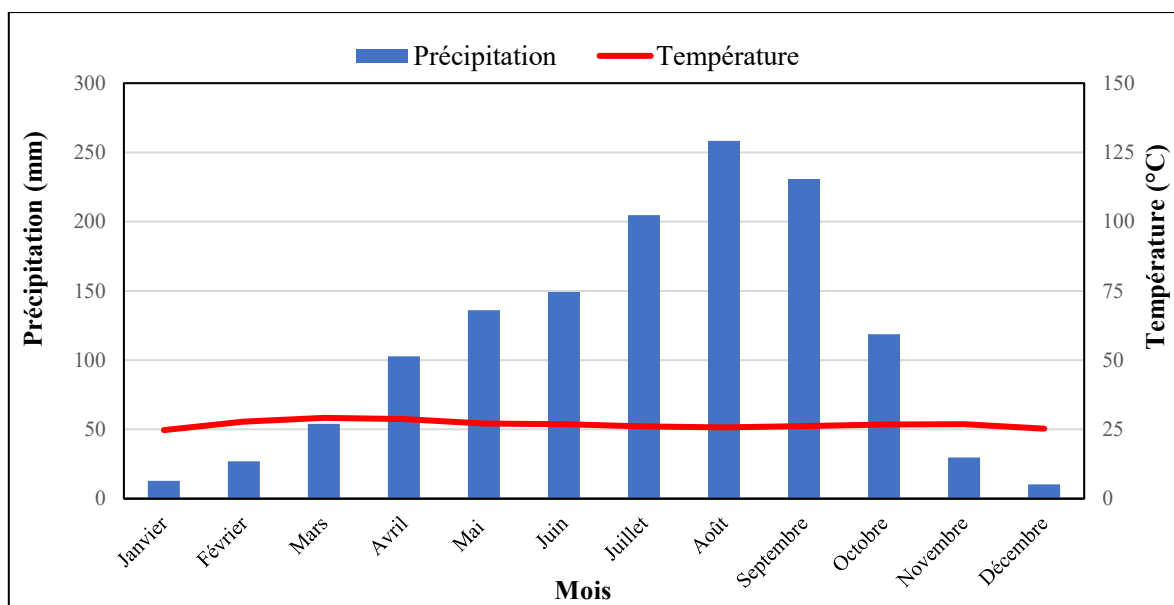


Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la station de Borotou Koro sur la période 2001-2020

1.2.2. Hydrographie du bassin versant

Le réseau hydrographique du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona est représenté à la figure 3. Les principaux affluents du Sassandra dans cette partie sont le Tiemba et le Sien qui prennent leur source dans le département d'Odienné et qui coulent dans la direction Nord-Sud. A ceux-là, s'ajoute la Boa qui est le premier affluent en rive gauche qui prend sa source en Guinée et coule dans la direction Ouest-Est jusqu'à son confluent avec la Tiemba, à partir duquel il prend une direction Nord-Sud. Ces affluents croisent le Bagbè ou (la FéréDougouba), deuxième affluent de rive gauche qui prend également sa source en Guinée. Signalons que c'est la rencontre du Tiemba, du Sien, du Boa et du Bagbè au niveau du village de Dabala qui forme le fleuve Sassandra qui coule dans la direction Nord-Sud. En dehors de ses affluents importants,

il existe de plus petits qui sont plus ou moins permanents et qui contribuent fortement aux écoulements dans le bassin versant.

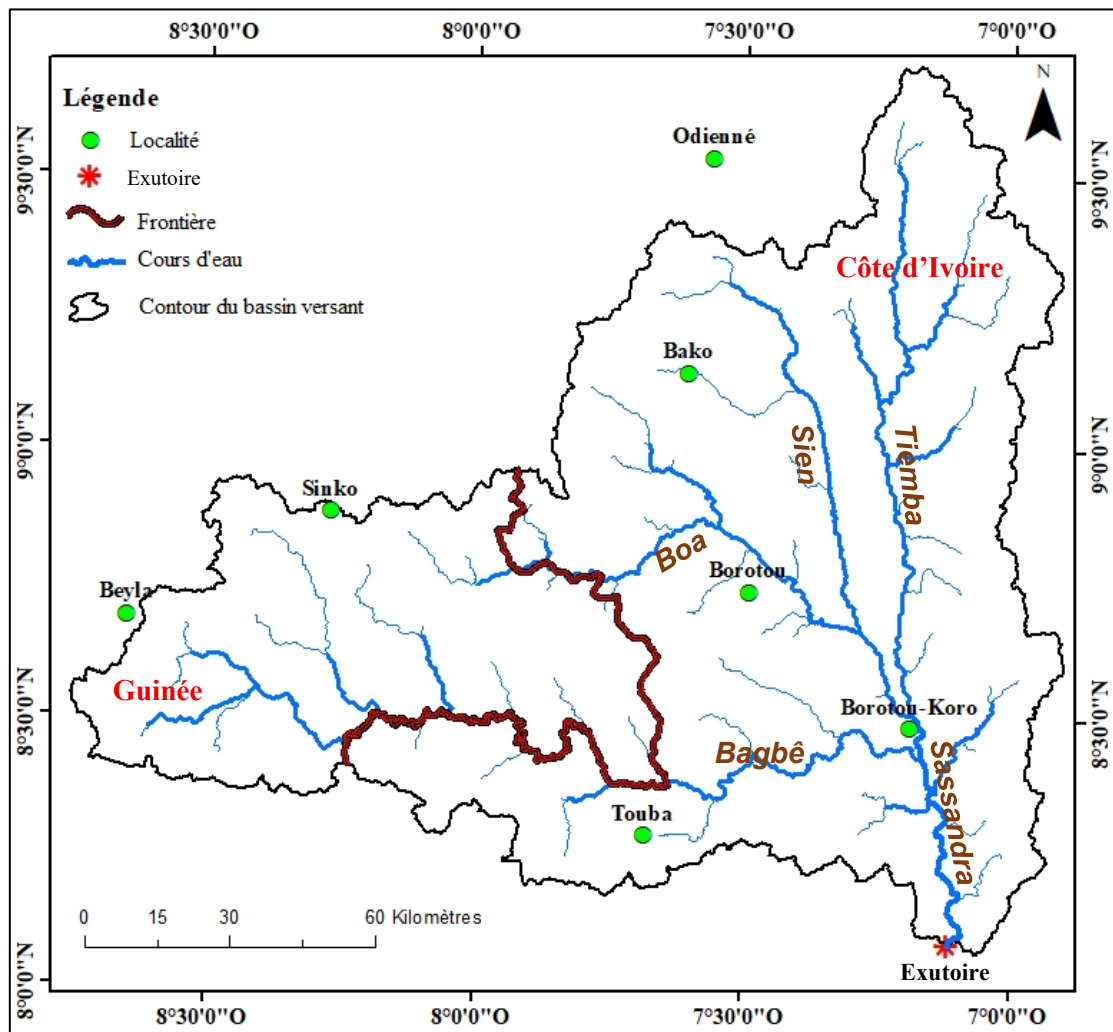


Figure 3 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

1.3. Caractéristiques physiques du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

1.3.1. Relief du bassin versant

Comme l'ensemble de la région Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire, le bassin versant est occupé par des hauts reliefs de blocs granitiques. Il y a des reliefs de formes tabulaires et souvent cuirassés (Traoré *et al.*, 1995). Les altitudes rencontrées sont comprises entre 214 m et 1 251 m comme indiqué par la figure 4. Les altitudes supérieures à 526 m qui correspondent aux montagnes sont généralement situées à l'Ouest du bassin dans la région de Beyla en Guinée. À l'Est du bassin en territoire ivoirien, les altitudes rencontrées sont comprises entre 255 et 450 m qui correspondent généralement au relief de plateau.

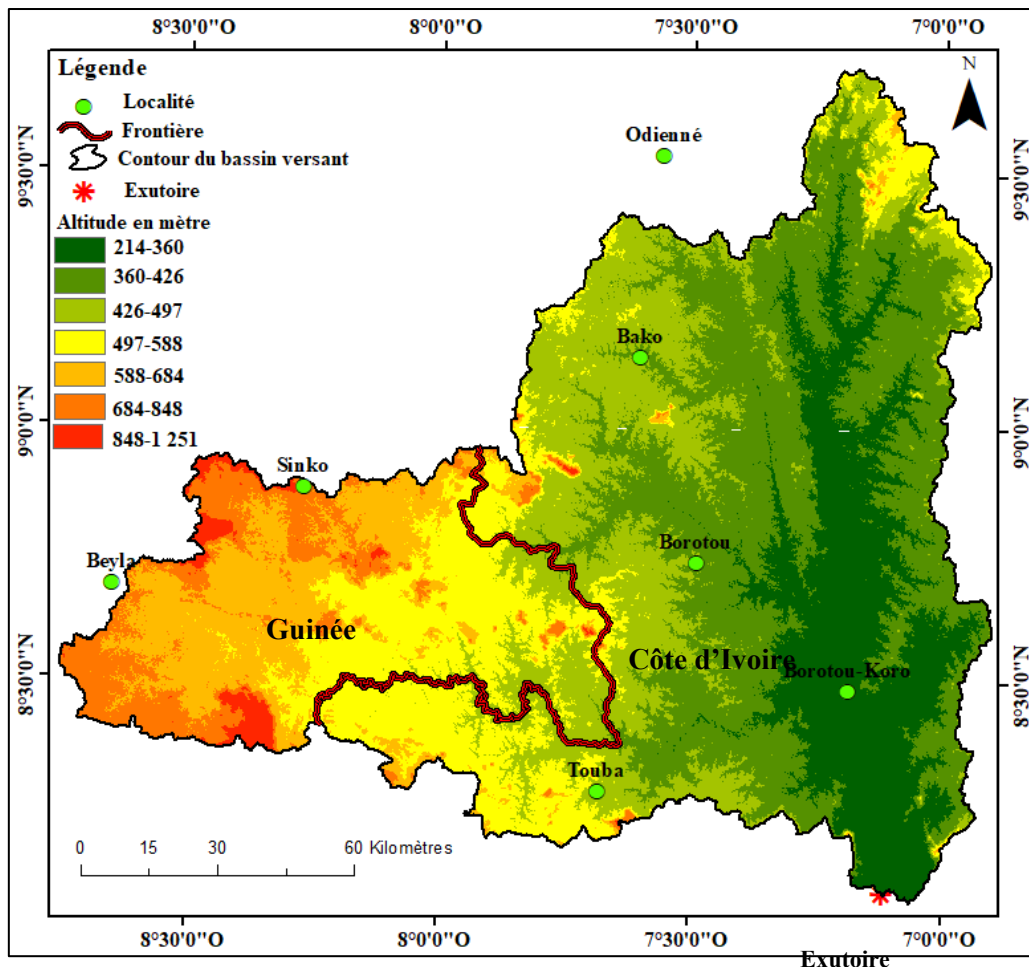


Figure 4 : Carte du relief du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

1.3.2. Géologie du bassin versant

Selon Camil (1972), la répartition géologique du bassin versant du fleuve Sassandra (Figure 5) est telle que, la partie Est, est essentiellement constituée de granites et de migmatites. La partie Ouest du bassin versant (en Guinée) est sur du granite à hypersthène très résistant qui permet d'expliquer la zone montagneuse. Au niveau de Touba dans la partie Sud, on retrouve les granites et migmatites qui cohabitent avec des gneiss et des quartzites. Cette dernière occupation géologique se prolonge dans le département d'Odienné en suivant le lit du fleuve Sassandra et ses affluents. On trouve également des dolérites, des gabbros et du basalte dans cette partie Sud du bassin versant. La rivière Boa traverse une zone de granite et de migmatite avant d'entrer dans la zone de quartz et de gneiss (Traoré *et al.*,1995).

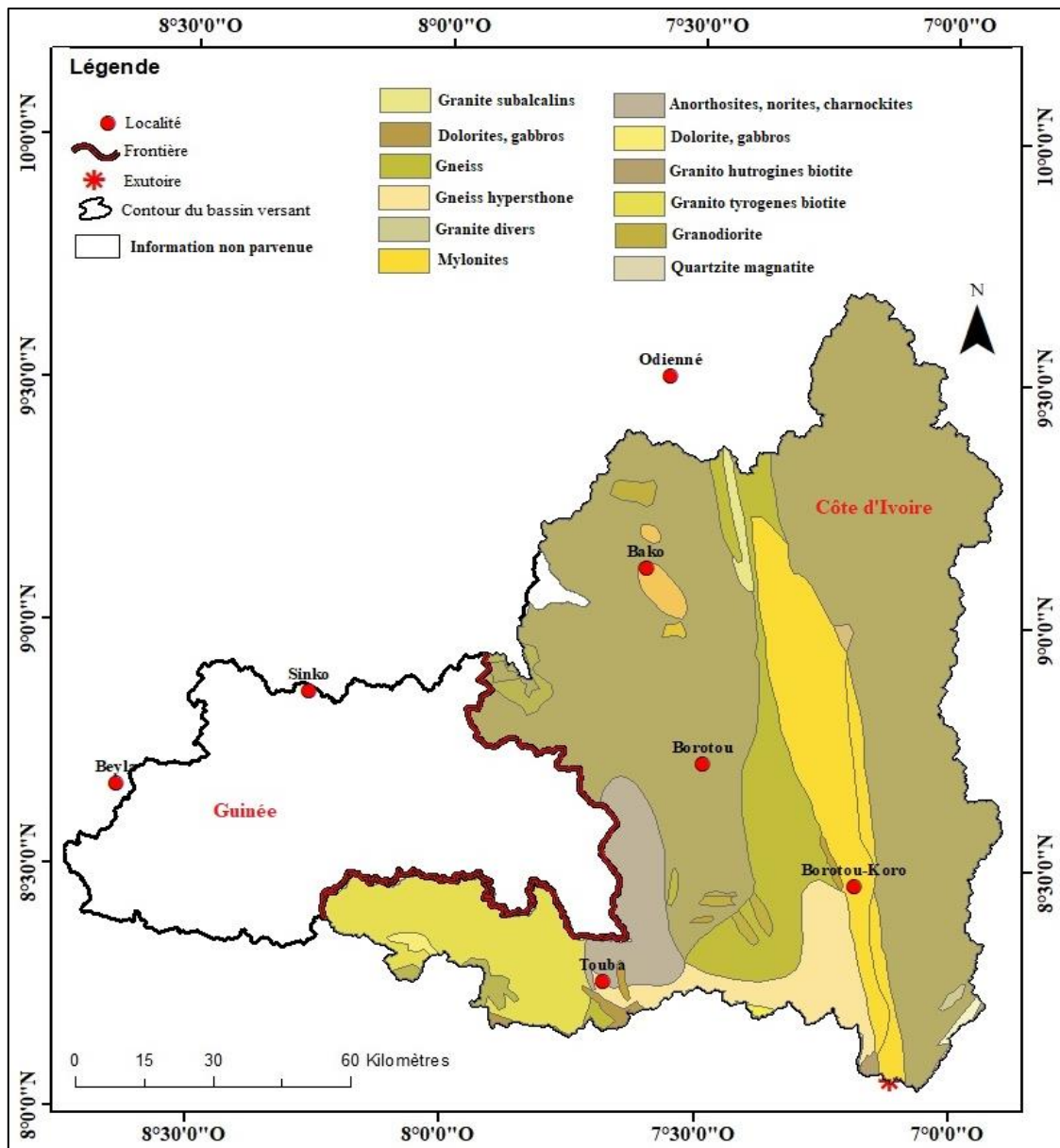


Figure 5: Carte géologique du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona ^{Exutoire}

1.3.3. Situation agro-pédologique du bassin versant

Les sols de Côte d'Ivoire sont généralement ferrallitiques. Cependant, ils se subdivisent en plusieurs sous-types que sont définis d'après le degré d'intensité de deux phénomènes appliqués aux matériaux : l'un d'ordre chimique la plus grande désaturation en bases, et l'autre d'ordre mécanique, le plus grand remaniement (Traoré *et al.*, 1995). D'une façon générale, dans le bassin versant, les sols sont de types ferrallitiques fortement ou moyennement désaturés. Ce sont des sols qui présentent les caractères de fertilité très variables. Cependant, on peut noter que ces sols sont propices à la culture du coton, de l'igname, du manioc, du riz pluvial, l'anacardier, la canne à sucre et au maïs.

1.3.4. Végétation du bassin versant

Trois grands ensembles de végétaux se rencontrent dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona (Figure 6). Au Nord du bassin versant, autour de la localité d'Odienné, on identifie la savane arborée avec quelques îlots de forêts claires sèches. Les forêts denses sèches se rencontrent principalement entre Borotou, Vialadoukou et Koro. En plus de ces forêts, le paysage présente des strates herbacées comportant des graminées en touffes (*Andropogon tectorum*, *hyparrhenia chrysargyrea*). Les ligneux les plus représentés sont *Isoberlimadoka*, *Clapacee Togoensis*, *Danillia oliveri*, *Khaya senegalensis*. L'ensemble de ces strates herbacées constitue la savane herbeuse sur le bassin versant (Traoré *et al.*,1995).

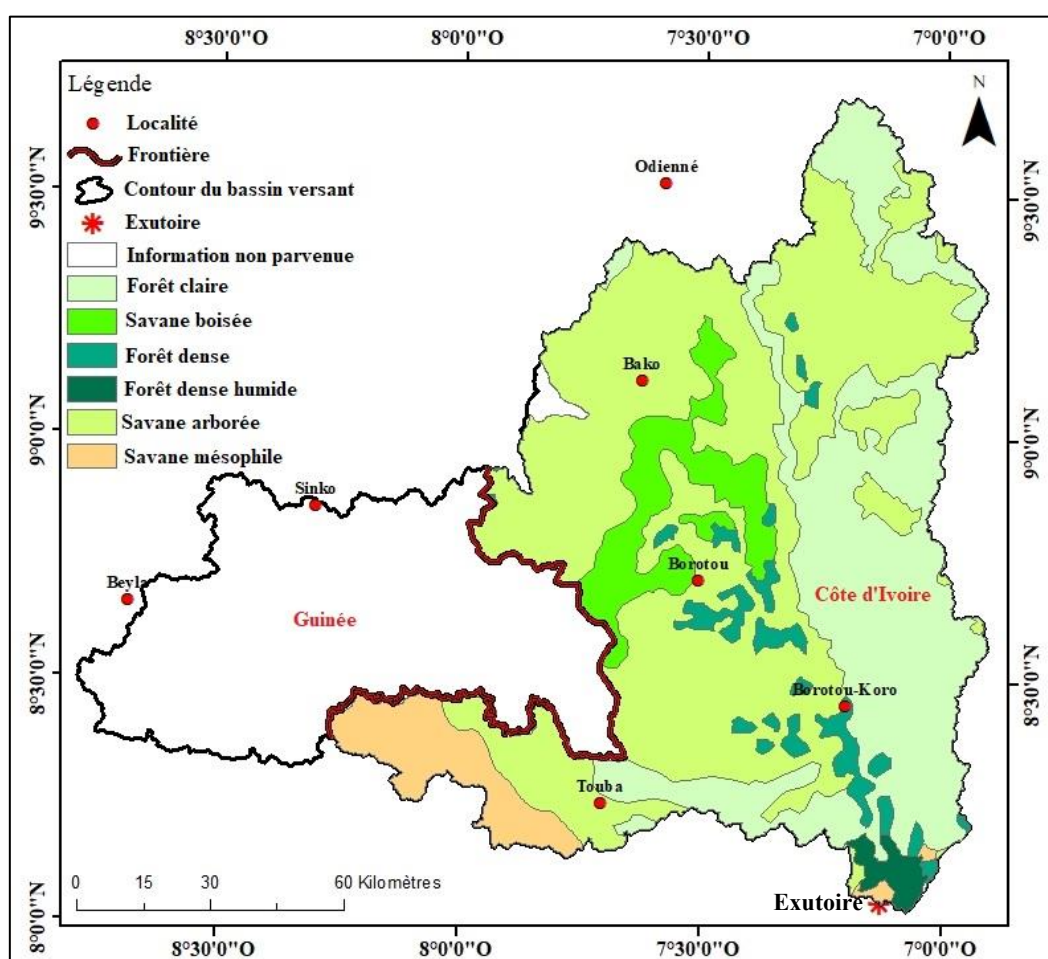


Figure 6 : Carte de la végétation du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

1.4. Présentation de la structure d'accueil : Sucrivoire

1.4.1. Historique

En 1971, la société d'Etat pour le développement des plantations de canne à sucre (SODESUCRE) fut instituée sous la présidence de feu Félix Houphouët-Boigny. Quatre unités industrielles furent établies successivement : deux à Ferkessédougou (Ferké I et Ferké II), une

à Borotou et une autre à Zuénoula. De nombreuses plantations villageoises de canne à sucre se sont développées autour de ces installations. Les objectifs initiaux consistaient principalement à répondre à la demande intérieure en sucre, avec en second lieu, l'ambition de positionner la Côte d'Ivoire parmi les principaux exportateurs de sucre au sein de la sous-région. Toutefois, face à la chute des prix internationaux du sucre au début des années 1990, l'État ivoirien fut contraint de se désengager des secteurs non productifs, entraînant ainsi la privatisation de SODESUCRE en 1997. Deux opérateurs privés prirent alors le relais en occurrence Sucrivoire, filiale du groupe SIFCA, qui acquit les unités et plantations industrielles situées à Borotou et Zuénoula, et Sucaf (Côte d'Ivoire) s'implanta sur les unités industrielles agricoles de Ferké I et Ferké II.

1.4.2. Organisation générale de Sucrivoire

L'organigramme des principales directions de Sucrivoire se présente comme suit par la figure 7.

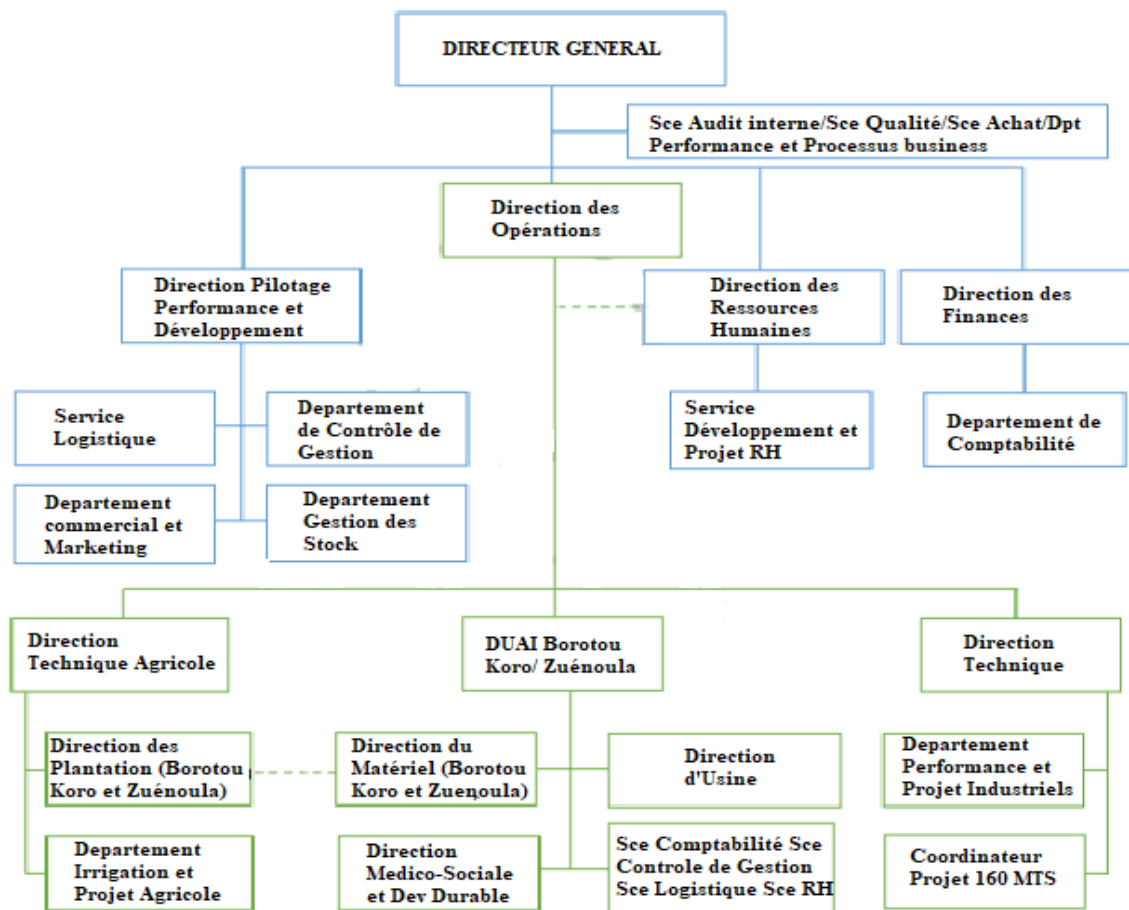


Figure 7: Organisation générale de Sucrivoire (Hamza & Oumar, 2021)

1.4.3. Unité Agricole Intégrée de Borotou-Koro (UAIBK)

L'Unité Agricole Intégrée de Borotou Koro est située dans le département de Koro au Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire entre les longitudes 7°00 et 7°18 Ouest et les latitudes 8°20 et 8°36 Nord (Figure 8). Cette unité agricole de 30 888 ha comprend une base vie appelée cité verte et des exploitations agricoles réparties en trois grands secteurs. Le secteur B qui est le plus grand, ensuite le secteur C et enfin le secteur D le plus petit. Sur ces différents secteurs, la canne à sucre est cultivée en irrigué comme en mode pluvial. Chaque secteur agricole est également doté d'une station de pompage d'eau et d'un réseau hydraulique pour l'irrigation des parcelles de canne à sucre. Les stations B et C sont directement reliées à la rivière Bagbé et la station D est reliée au fleuve Sassandra. L'UAIBK produit en moyenne 54 000 tonnes de sucre par campagne.

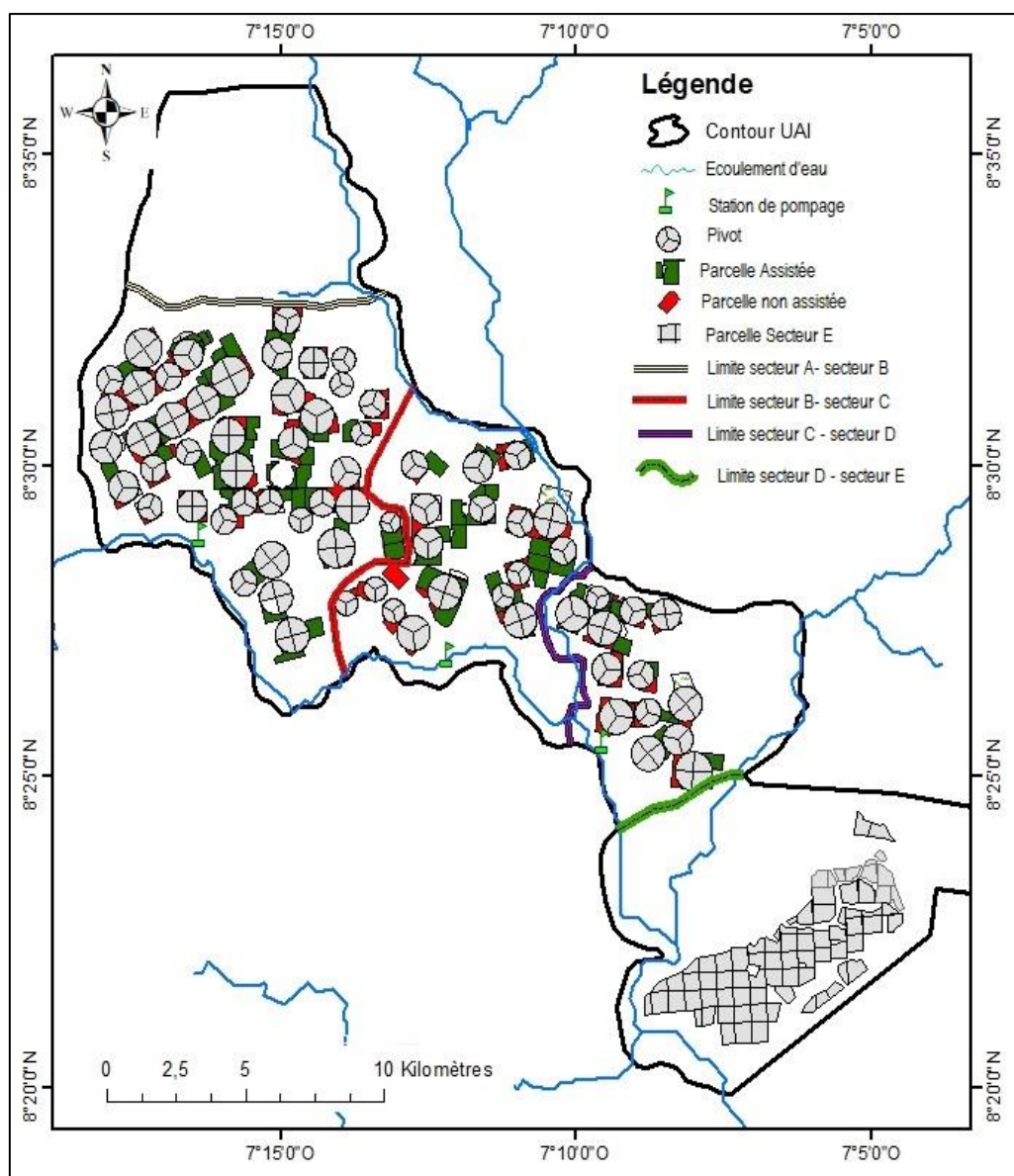


Figure 8: Carte de l'Unité Agricole Intégrée de Borotou-Koro

1.4.4. Population dans l'UAIBK

La population du complexe de Borotou-Koro est de 11 798 habitants (RGPH, 2014). Pendant les campagnes, cette population peut être estimée à près de 18 000 habitants. La population dans l'UAIBK croît à un rythme rapide comparativement à celui de la croissance générale de la population nationale. En 1998, cette population était estimée à environ 10 612 habitants. Mais en 2014, elle a évolué et est estimée à 11 798 habitants, soit 5,4 % de la population totale de la Côte d'Ivoire. Cette évolution de la population est présentée dans le tableau I. La population de UAI-BK est un mélange où l'on rencontre toutes les entités ethniques du pays et des pays voisins. La zone est un espace de contact entre la savane et la forêt. Elle subit donc des taux migratoires très importants, car très propice pour les pratiques agricoles et la présence d'activité industrielle. De ce fait, Borotou-Koro constitue un point de convergence des populations.

Tableau I : Evolution de la population du complexe sucrier de Borotou Koro

| Population | RGPH 1998 | | | RGPH 2014 | | |
|---------------------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | Homme | Femme | Total | Homme | Femme | Total |
| Borotou Koro | 5603 | 5009 | 10612 | 6523 | 5275 | 11798 |

Source : INS (2021)

1.4.5. Activités socio-économiques dans l'UAIBK

L'économie dans la zone d'étude repose sur l'agriculture. La fertilité des sols et la pluviométrie permettent une bonne diversification des cultures de rente et des cultures vivrières. L'anacarde est en passe de devenir la principale culture de rente dans le bassin versant, parce qu'il est cultivé dans tous les départements. Ensuite, il y a le binôme café-cacao, produit dans la sous-préfecture de Guintéguela, dans la forêt bordant le fleuve Sassandra et dans le département de Ouaninou. La canne à sucre est produite singulièrement dans le département de Koro, dans la zone d'implantation du complexe agro-industriel de Borotou-Koro de la société Sucrivoire, auquel elle sert de matière première. A côté de l'unité industrielle et ses exploitations agricoles, il a été initié des plantations de cannes villageoises, afin de permettre aux populations riveraines d'avoir des revenus substantiels. Le soja et le coton, produits à profusion il y a quelques années, sont aujourd'hui en baisse. Le projet de développement de la culture du soja, démarré en 1989 a été interrompu par la guerre en 2002. Les cultures vivrières que sont le riz, le maïs, le manioc, le haricot, l'igname et la patate douce sont produites en quantité importante dans la zone pour les besoins alimentaires de la population et le commerce. En outre, l'élevage occupe une place de choix dans l'économie de la zone d'étude.

Conclusion partielle

Le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona est caractérisé par un climat de type tropical humide avec deux saisons. Une saison sèche et une saison humide. Le relief dans le bassin versant est accidenté avec des altitudes qui varient entre 214 et 1 251 m. La répartition géologique du bassin versant, est constituée de granites et de migmatites dans la partie Est et de granites dans la partie Ouest du bassin versant. Dans la partie Sud, les granites, les migmatites, les gneiss et des quartzites sont les plus rencontrés. Des dolérites, des gabbros et des basaltes sont aperçus dans la partie Sud du bassin versant. Ces formations géologiques sont recouvertes de sols de types ferrallitiques fortement ou moyennement désaturés. Trois grands ensembles de végétaux se rencontrent dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona. Autour de la localité d'Odienné, on identifie des savanes arborées avec quelques îlots de forêts claires sèches. Les forêts denses sèches se rencontrent principalement entre Borotou, Vialadougou et Koro. Ces atouts naturels favorisent des activités agro-industrielles et économiques lucratives pour les populations qui sont de plus en plus croissantes.

CHAPITRE 2 : VARIABILITÉ CLIMATIQUE ET AGRICULTURE EN AFRIQUE DE L'OUEST

2.1. Variabilité hydroclimatique en Afrique de l'Ouest

2.1.1. Facteurs du climat en Afrique de l'Ouest

La circulation des masses d'air intervient en partie dans la définition du climat d'une région et constitue ainsi non seulement le facteur dominant de la mise en place des paysages, mais aussi le facteur dominant des régimes hydroclimatiques. La répartition énergétique dans le système Terre - Océan - Atmosphère n'est pas uniforme : le bilan est excédentaire aux basses latitudes et déficitaire au-delà du 50^{ème} parallèle. On peut considérer que ce système est composé d'une source chaude située dans les régions intertropicales et de deux sources froides situées dans l'atmosphère, l'une vers 300 hPa entre 0° et 10° de latitude, l'autre vers 800 hPa entre 50° et 80° de latitude. Cette répartition différentielle du bilan radiatif provoque la mise en mouvement de l'atmosphère et se traduit dans les régions intertropicales par le développement des circulations méridiennes cellulaires de type Hadley, transférant l'énergie vers le haut et vers les pôles (Dhonneur, 1985 ; Mahé, 1993). Les circulations de type Hadley ont une évolution saisonnière marquée avec un déplacement estival en direction du pôle Nord et une intensification de la cellule de l'hémisphère d'hiver. La zone de convection commune à ces circulations entourant le globe est appelée zone de convergence inter tropicale ou équateur météorologique. C'est une zone de concentration de la vapeur d'eau, advectée par les alizés dans les basses couches, et de libération de chaleur latente par ascendance et condensation. C'est aussi le lieu où l'énergie reçue par l'atmosphère est maximale. Ses caractéristiques sont très liées aux conditions de surface. Cette zone, suit au cours de l'année les lieux de températures maximales, en liaison avec le mouvement apparent du soleil, en marquant quatre à huit semaines de retard. Aux mois de juillet et d'août, au-dessus de l'Afrique de l'Ouest, le mouvement vers le Nord de la zone de convergence inter tropicale est amplifié par un important gradient méridien de pression dans les basses couches de la troposphère, résultant de la mise en place d'une forte dépression thermique de surface au-dessus du Sahara (Figure 9). Les alizés de l'hémisphère Sud se chargent en vapeur d'eau au-dessus du golfe de Guinée, remontent alors loin vers le Nord en Afrique de l'Ouest, s'inclinant vers le Sud-Ouest sous l'effet de la force de Coriolis. C'est le moment du plein développement de la mousson en Afrique occidentale et centrale (Leroux, 1981). Au Sahel, en bordure Sud du Sahara entre environ 15° N et 20° N, celle-ci se traduit en été boréal majoritairement par la formation de lignes de grains. Se déplaçant de l'Est vers l'Ouest à une vitesse moyenne d'environ 15 m.s⁻¹, elles peuvent être décrites comme des entités à méso-échelle, consistant en l'agglomération dans une direction Nord-Sud jusqu'à 1000 km d'extension

méridienne de nuages de type cumulonimbus fortement convectifs, suivis par des nuages stratiformes à l'arrière (300 à 500 km d'extension zonale). Les lignes de grains sont responsables d'au moins 80 % du total annuel des précipitations au Sahel.

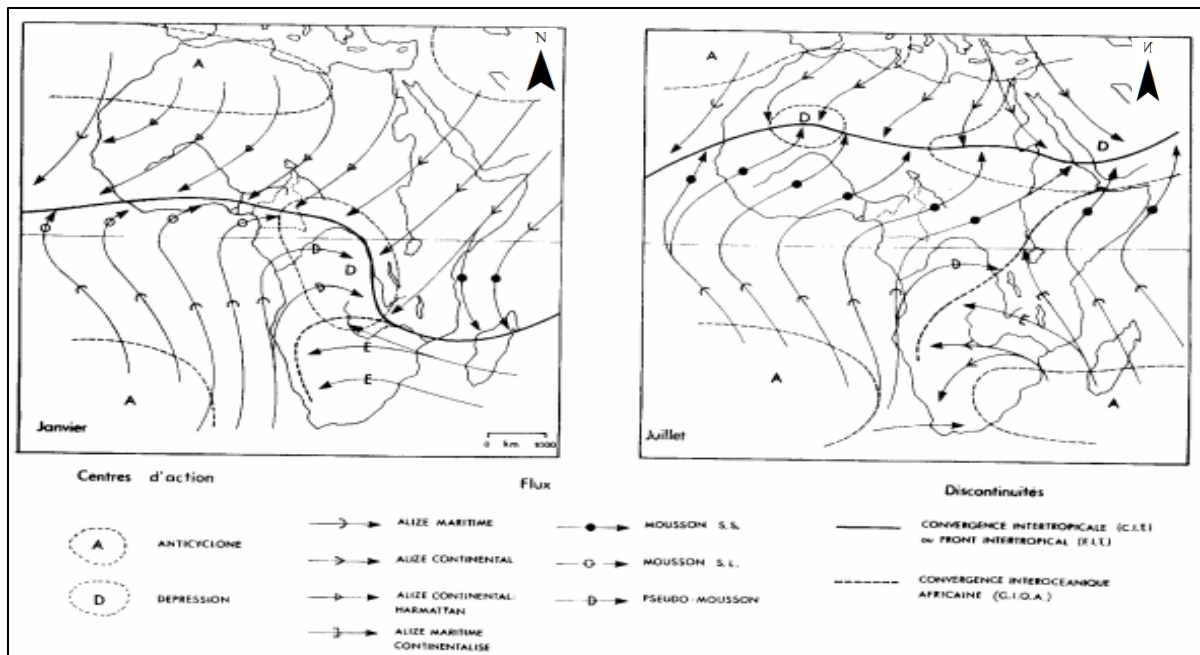


Figure 9: Centres d'action atmosphérique
Source : Suchel (1987)

2.1.2. Variation pluviométrique en Afrique de l'Ouest

La variation des précipitations représente le facteur le plus important du climat tant pour les habitants que pour les écosystèmes. Les premiers indices de la sécheresse actuelle apparaissent dans la région sahélienne, définie par Rodier (1964) comme la bande de pluviométrie comprise entre 300 mm et 750 mm. L'analyse des données de quelques stations au début du siècle permet d'identifier d'autres périodes précédemment sèches (1910-1916 et 1940-1949). La sécheresse de la période 1910-1916 semble avoir été la plus intense, l'année 1913 étant plus sèche que 1972 et 1973 (Sircoulon, 1976a). Certaines stations situées aussi bien en zone sahélienne qu'en zone humide ouest-africaine présentent des déficits de l'ordre de 30 à 60 %. En effet, le début des années 1980 marque un tournant important avec les travaux de Nicholson (1980, 1981, 1986), qui fournissent une première vision de l'ensemble de la variabilité spatio-temporelle des précipitations en insistant sur la régionalisation et la persistance de la récente sécheresse. Les années 1982 à 1984 enregistrent des précipitations encore plus faibles que celles de 1972-1973. Dans les études qui ont suivie, il est mis en exergue la notion de changement de climat ou de rupture dans l'homogénéité statistique des séries pluviométriques.

Ainsi, Sircoulon (1976b) montre que la séquence pluviométrique 1970-1980 est statistiquement différente de la séquence 1931-1969 sur l'ensemble du Sahel. La persistance de la sécheresse fait naître une nouvelle voie de recherche. Hubert & Carbonnel (1987), Demarée & Nicolis (1990) et Lubés-Niel *et al.* (1995) n'analysent plus l'évolution chronologique des données en termes d'évolution progressive et linéaire d'une situation excédentaire vers une autre déficitaire. Ils les analysent en termes de transition brusque d'un état climatique vers un autre. Ces auteurs ont mis en évidence une transition majeure autour de l'année 1970, par application de tests statistiques de détection de rupture dans des séries chronologiques. Considérant dès lors les séries pluviométriques comme divisées en deux séquences (une avant la rupture et l'autre après). Les auteurs se sont aussi attardés sur des aspects quantitatifs, en évaluant les déficits d'une période ou d'une année par rapport à une situation précédente (Sircoulon & Olivry, 1986 ; Mahé, 1993; Olivry *et al.*, 1994 ; Bricquet *et al.*, 1996 ; Mahé & Olivry, 1995 ; Servat *et al.*, 1998 ; Servat *et al.*, 1999). La phase sèche actuelle se distingue des précédentes par sa persistance, son extension et son intensité. Elle se fait ressentir dans les régions plus humides, situées en bordure du golfe de Guinée à partir de la décennie 1980 (Olivry *et al.*, 1994 ; Mahé & Olivry, 1995; Paturol *et al.*, 1995; Servat *et al.*, 1997). Les déficits pluviométriques sont régulièrement supérieurs à 20 % entraînant une migration des isohyètes vers le sud sur la région (Figure 10). Cette rupture pluviométrique présente toutefois une forte hétérogénéité spatio-temporelle (Servat *et al.*, 1998 ; Laraque *et al.*, 2001). A l'échelle temporelle, la décennie 1980 est considérée globalement comme la plus déficitaire (Servat *et al.*, 1997 ; Mahé *et al.*, 2001). Quelques travaux intégrant la décennie 1990, généralement peu documentée, indiquent une amélioration des conditions pluviométriques au cours de cette dernière (L'Hôte *et al.*, 2002). L'hétérogénéité spatiale est surtout remarquable en zone côtière et en Afrique centrale (Bigot, 1997 ; Bigot *et al.*, 1998 ; Sigha-Nkamdjou *et al.*, 2002). Dans la partie Sud du Nigeria en particulier et dans le fond du golfe de Guinée, la baisse de la pluviométrie semble ne pas être décelable (Adejuwon *et al.*, 1990 ; Mahé, 1993 ; Mahé & Citeau, 1993). Cette même observation est également faite à l'extrême Ouest de la Côte d'Ivoire (Paturol *et al.*, 1997) et le Sud Est de la Guinée (Mahé & Citeau, 1993). Les explications du phénomène de sécheresse en Afrique tropicale sont restées au stade de simples hypothèses. Certains auteurs tels Tanaka *et al.* (1975) suggèrent deux explications : une position plus méridionale de l'équateur météorologique, qui limiterait l'apport de vapeur d'eau ; ou une diminution de la convection malgré une position « normale » de l'équateur météorologique. Cette situation entraînant une diminution de l'intensité de la saison des pluies. Cette deuxième hypothèse sera d'ailleurs reprise par Nicholson (1986), Shinoda (1990), Fontaine *et al.* (1998), Moron (1994) soulignant

quant à eux, l'influence en partie, des températures de surface de l'océan (El Niño et Oscillation australe). Enfin, pour d'autres, la végétation pourrait jouer un rôle car elle réinjecte localement dans l'atmosphère de la vapeur d'eau, notamment en Afrique équatoriale (Monteny *et al.*, 1985 ; Fontaine, 1990 ; Bigot, 1997). Ce recyclage peut atteindre, dans la forêt tropicale de la Côte d'Ivoire, les 2/3 de l'eau précipitée (Fontaine, 1990).

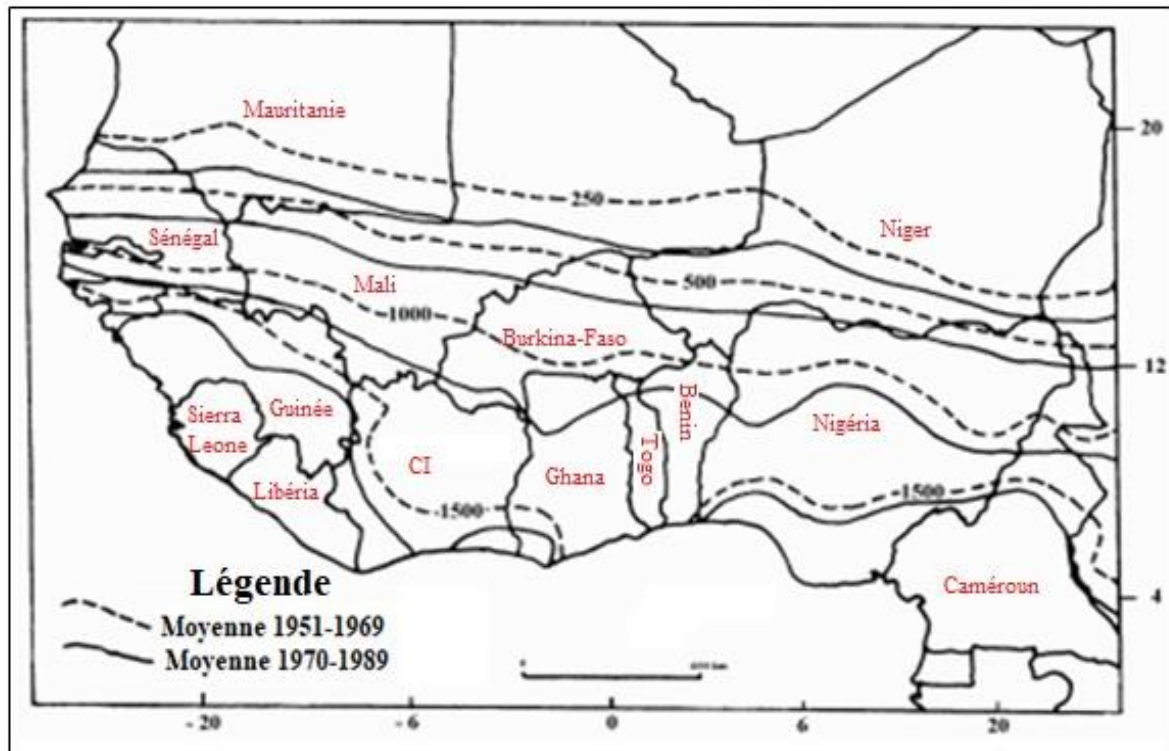


Figure 10: Déplacement vers le Sud des isohyètes sur les périodes 1951-1969 et 1970-1989
Source : L'Hôte & Mahé (1996)

2.1.3. Variation des écoulements en Afrique de l'Ouest

Les mesures sur le réseau hydrométrique des pays de l'Afrique occidentale et centrale ne datent que du début des années 1950. Seules quelques stations situées sur des grands cours d'eau tropicaux tels que le Sénégal, le Niger et le Congo remontent au début du siècle et permettent de faire des suppositions concernant les deux premières sécheresses du siècle (Sircoulon, 1976). Pour ce qui est des analyses sur l'évolution des apports des cours d'eau de l'Afrique tropicale, le constat est général, la baisse prolongée des précipitations a eu des incidences parfois graves sur les écoulements. Plusieurs auteurs parmi lesquels Olivry *et al.* (1993), Bricquet *et al.* (1997), Mahé & Olivry (1999), Mahé *et al.* (2000) et Laraque *et al.* (2001) ont présenté le même bilan. Le phénomène est concomitant avec celui observé en pluviométrie. Les fleuves de la zone humide connaissent une légère remontée des débits après la première phase de la sécheresse de 1972-1974, que Laraque *et al.* (1995) décrivent plus localement sur le fleuve Congo, avant d'être significativement affectés à partir des années 1980.

Ceux de l'Afrique sèche n'ont pas connu de décalage entre les répit de diminution de la sécheresse depuis le début des années 1970. Les résultats des tests statistiques identifient dans les chroniques des débits, une phase de discontinuité statistique autour de l'année 1970, qui coïncide avec la rupture pluviométrique (Hubert *et al.*, 1989 ; Lubés-Niel *et al.*, 1995). En termes de déficit, les valeurs relatives sont situées entre 30 % et 50 %, et parfois plus. Celles-ci traduisent un véritable effondrement des ressources en eau en Afrique. C'est alors à juste titre que Olivry *et al.* (1998) adoptent le terme de « fleuves malades d'Afrique ». Il faut noter que les déficits sont plus significatifs en valeurs relatives dans la zone soudano-sahélienne mais plus significatifs en valeurs absolues en Afrique humide. L'amplification des déficits des écoulements comparativement aux déficits pluviométriques est due à un « effet mémoire de la sécheresse » qui est apparu dans les écoulements à la suite des effets cumulatifs des déficits pluviométriques successifs. L'analyse des basses eaux des fleuves tropicaux montre de ce fait une faiblesse quasi générale des débits d'étiage, avec une tendance à la baisse régulière qu'accompagne une accélération du tarissement (Pouyaud, 1986 ; Lienou *et al.*, 1999). Ce phénomène traduit un amenuisement des réserves souterraines des bassins fluviaux suite à une réduction de leur alimentation, conséquence d'une succession d'années de pluviométrie faible, souvent aggravée par des perturbations d'origine anthropique.

2.1.4. Causes de la variabilité hydroclimatique

Les caractéristiques physiques du milieu résultent d'un équilibre entre continent et atmosphère. Les fluctuations climatiques sont les agents naturels les plus à même d'entraîner des modifications importantes de la végétation. Elles-mêmes responsables de forçages régionaux par le biais de rétroactions bioclimatiques, et de changements de la température de surface terrestre (Monteny, 1986). Selon Hulme & Kelly (1993), durant les 50 prochaines années, en zones tropicales humides, ce sont plus les changements de couverture qui vont déterminer les variations substantielles du climat régional. Mais les perturbations climatiques antérieures, mises en évidence par les données de la végétation ne peuvent être imputées à l'homme, celles-ci ayant eu lieu bien avant l'apparition de l'homme, ou du moins avant l'explosion industrielle (Maley, 1996). Les activités anthropiques ont favorisé l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ce qui a abouti au dérèglement climatique affectant ainsi le cycle de l'eau. Durant le Quaternaire récent, l'extension des milieux ouverts a été mise en relation avec les changements du climat dus aux variations des températures marines, bien avant le développement des civilisations humaines (Sultan *et al.*, 2001). Mais la récente sécheresse intervient au moment où les activités humaines augmentent de façon considérable.

Les destructions de forêts et les émissions de gaz à effet de serre sont souvent évoquées pour expliquer l'accroissement de la température (Dunglas, 1993). Dans les zones forestières où l'activité atmosphérique a une origine continentale, des travaux plus récents se sont focalisés sur la déforestation et les fluctuations climatiques. Yao *et al.* (1998) établissent dans la zone de forêt dense humide de la Côte d'Ivoire, un parallélisme entre la baisse de la pluviométrie, la déforestation et l'augmentation des activités humaines. Il apparaît donc que l'évolution à long terme du climat et les changements environnementaux à l'échelle globale sont influencés par les variations naturelles et les perturbations anthropiques. L'impact des transformations des états de surface rend encore plus difficile la compréhension des relations pluies-écoulements déjà complexes. Albergel & Valentin (1991) lient l'augmentation des coefficients d'écoulement sur des petits bassins à une transformation des états de surface telle que la destruction de la couverture végétale et l'encroûtement des couvertures pédologiques superficielles. En contrario, Rodier & Ribstein (1986) ont conclu que la récente sécheresse n'a guère modifié les apports moyens annuels sur les petits bassins versants, car la péjoration pluviométrique et l'augmentation du taux de ruissellement, due à l'augmentation des surfaces imperméables, agissent de façon contradictoire. Par ailleurs, les études de Mahé *et al.* (2002) mettent en évidence un accroissement des coefficients d'écoulement sur un bassin versant de taille plus importante, le bassin versant du Nakambé à Wayen (Burkina Faso) dont la superficie est voisine de 20 000 km². Les auteurs pensent que le phénomène est tributaire des aléas climatiques mais aussi, et surtout, des activités anthropiques (destruction du couvert végétal naturel, augmentation des surfaces cultivées, augmentation des superficies des sols dénudés et réduction de la capacité en eau des sols). Les particularités locales de la variabilité des écoulements affectent aussi les nappes d'eau souterraines. Le ruissellement accru sur certains bassins versants sahéliens alimente parfois des dépressions endoréiques qui dans certains cas peuvent être des zones d'alimentations privilégiées des eaux souterraines, où une hausse du niveau piézométrique s'observe (Leduc *et al.*, 2001). La variabilité climatique que connaît l'Afrique soudano-sahélienne depuis le début de la décennie 1970, définit une phase climatique caractérisée par sa durée, son intensité et son extension. Cette singularité du climat fait ressortir des anomalies climatiques significatives observées au cours de ces dernières années qui renvoient à des types d'événements climatiques exceptionnels où extrêmes tels que les sécheresses, les inondations, les vagues de froid et de chaleur et les fortes pluies. Mais c'est au début des années 1980 qu'il atteint significativement les régions d'Afrique dites humides, où son hétérogénéité spatiale est notable.

2.1.5. Évolution hydroclimatique dans un contexte de changement climatique en Afrique de l'Ouest

De nombreuses études comme celles de Groisman *et al.* (2005), Webster *et al.* (2005) et Alexander *et al.* (2006) ont constaté que l'évolution du climat au cours des cinquante dernières années est marquée par un réchauffement exceptionnel, accompagnée par des changements dans différents types de phénomènes climatiques. Les principaux changements peuvent être résumés ainsi : une augmentation du nombre des vagues de chaleur et des nuits chaudes, une augmentation de l'étendue des régions affectées par des sécheresses, une augmentation du nombre d'événements de précipitations intenses aux latitudes moyennes, une augmentation de l'intensité et de la durée des tempêtes tropicales depuis 1970 et un déplacement des storm tracks vers les pôles. Ces dernières décennies, l'une des questions récurrentes est celle de savoir si les modifications observées dans les régimes climatiques peuvent être attribuées au réchauffement climatique et donc à l'effet de serre anthropique. L'état actuel des connaissances, montre que la fréquence et l'intensité des événements climatiques sont sensibles au réchauffement global (Seneviratne *et al.*, 2016). L'appréhension des processus physiques dans l'océan et l'atmosphère permettent d'entrevoir un éventuel lien entre les changements climatiques et les événements extrêmes. Les gaz à effet de serre (GES), naturellement présents dans l'atmosphère, contribuent à retenir la chaleur et maintiennent ainsi des conditions propices à la vie sur terre. L'augmentation de leur concentration occasionne un déséquilibre du bilan énergétique terrestre, avec un chauffage additionnel de $2,65 \text{ W. m}^2$. L'augmentation de la température favorise l'évaporation de l'eau, ce qui fournit davantage de chaleur latente dans l'atmosphère. Cette énergie pourrait d'une part agir sur la dynamique des systèmes météorologiques tels que les zones de basse pression (Lambert & Fyfe, 2006). D'autre part, cette situation peut donner naissance à de fortes rétroactions sur le cycle hydrologique (Allen & Ingram, 2002). Dans le cadre de ces raisonnements physiques très simples, il y a donc quelques raisons de supposer que les régimes hydroclimatiques puissent changer. Certains effets statistiques font que les changements climatiques pourraient se manifester de façon plus prononcée dans la fréquence des événements météorologiques extrêmes, que dans celle des événements météorologiques normaux. Une simple hausse de la température moyenne signifie qu'il fait extrêmement chaud ou inversement. Les changements des fréquences des extrêmes peuvent être importants pour, en apparence, de faibles variations de la moyenne. Une augmentation de la variabilité sans changement de la moyenne peut engendrer un accroissement de la fréquence de deux types des extrêmes de température ainsi que l'importance de ces extrêmes. Une hausse de la moyenne et de la variabilité est aussi possible et peut occasionner des épisodes de chaleur plus fréquents et

moins d'épisodes de froid. Plusieurs autres types et combinaisons des changements de distributions des variables climatiques sont possibles et peuvent avoir des conséquences climatiques différentes.

2.2. Lien entre le climat et l'agriculture

Le climat a une influence très forte sur l'agriculture qui est considérée comme l'activité humaine la plus dépendante des variations climatiques (Oram, 1989). Les impacts du climat sur l'agriculture varient d'une région du globe à une autre, avec des conséquences socio-économiques particulièrement importantes dans les pays en développement. En effet, ces pays connaissent une grande variabilité climatique comme en Afrique de l'Ouest et dans bien des cas, leur pauvreté endémique augmente le risque et la gravité des catastrophes naturelles (PNUD, 2004). Les populations rurales de l'Afrique sub-saharienne sont particulièrement exposées aux aléas climatiques dans la mesure où elles sont étroitement dépendantes de l'agriculture pluviale qui représente près de 93% des terres cultivées. Selon FAO (2003), 80% des céréales consommées en Afrique sub-saharienne proviennent de cette production traditionnelle et le secteur agricole emploie 70% de la totalité de la main d'œuvre, représentant entre 15 et 20% du PIB. Outre cette dépendance climatique, la croissance rapide de la population et la pauvreté ne permettent pas un accès aux adaptations technologiques (mécanisation, engrais, irrigation), constituant des facteurs aggravant sur les impacts socio-économiques du climat (PNUD, 2004). Les faibles moyens de l'agriculture pluviale pour anticiper et enrayer les effets des fluctuations climatiques s'illustrent par une corrélation forte entre la productivité agricole et la pluviométrie. Les rendements tirés des statistiques nationales de la FAO sont exprimés en anomalies standardisées par rapport à la période 1965-2000. Cette vulnérabilité face au climat s'illustre également par le fait que depuis les années 1970, les plus grandes famines ayant nécessité un recours à l'aide alimentaire internationale (1974, 1984/1985, 1992 et 2002) sont entièrement ou en partie dues aux variations du climat (Dilley, 2005). Plus récemment, si la crise alimentaire de 2010 au Sahel, qui a touché plus d'un tiers de la population au Niger, a été provoquée par plusieurs causes, elle a été déclenchée par un déficit de pluie en 2009 qui a réduit la production alimentaire. Dans ce contexte, être capable de mieux comprendre et d'anticiper les fluctuations climatiques et leurs conséquences sur l'agriculture constitue donc un enjeu majeur en termes de développement et de sécurité alimentaire en Afrique sub-saharienne.

2.3. Impact du changement climatique sur l'agriculture

Si l'Afrique sub-saharienne est aujourd'hui fréquemment confrontée à l'insécurité alimentaire (FAO, 2017), qu'en sera-t-il dans le futur ? Un regard rétrospectif sur l'évolution de ces dernières années donne une image assez pessimiste pour le futur. En effet, en dépit d'une hausse de la production alimentaire, le très fort accroissement de la population a entraîné une augmentation du taux de pauvreté et de malnutrition en Afrique plus rapidement que n'importe où dans le monde. La comparaison de l'évolution de la production agricole par habitant pour les différentes régions en développement dans le monde est assez révélatrice du retard pris par l'Afrique sub-saharienne en matière d'autosuffisance alimentaire (Figure 11). En tenant compte des projections relatives aux besoins alimentaires d'ici 2050, période à laquelle les Nations Unies estiment que la population mondiale atteindra son maximum, il apparaît clairement que l'effort requis pour accroître la production alimentaire devra être considérable. Entre 2000 et 2050, selon Collomb (1999), l'Afrique devra plus que quintupler sa production alimentaire. L'avenir de cette région du monde repose donc sur la capacité du secteur agricole à relever le défi de nourrir une population en rapide augmentation. Ce défi sera d'autant plus ardu à surmonter dans un contexte où le changement climatique est déjà en cours et aura sans aucun doute des répercussions sur l'agriculture en Afrique, tout comme ailleurs. Le quatrième rapport du GIEC (2007), a en effet mis en garde la communauté internationale contre une élévation des températures à l'échelle mondiale ainsi qu'une probable augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes tels que les sécheresses. De plus, l'agriculture irriguée, notamment la culture du riz qui revêt une importance capitale pour l'alimentation urbaine en Afrique, sera également affectée non seulement par une éventuelle modification de la disponibilité en eau mais aussi par l'augmentation des températures, qui peut entraîner des pertes conséquentes de rendement (Dingkuhn *et al.*, 1995). Cependant même si le 4^{ème} rapport du GIEC conclut sur un risque accru de famine dans le futur en conséquence des bouleversements climatiques, il existe encore aujourd'hui de nombreuses incertitudes quant aux impacts du changement climatique sur l'agriculture en Afrique sub-saharienne (Roudier *et al.*, 2011). Il apparaît donc crucial de pouvoir fournir une image plus précise de l'évolution attendue du potentiel de production agricole en Afrique sub-saharienne dans le contexte du réchauffement climatique.

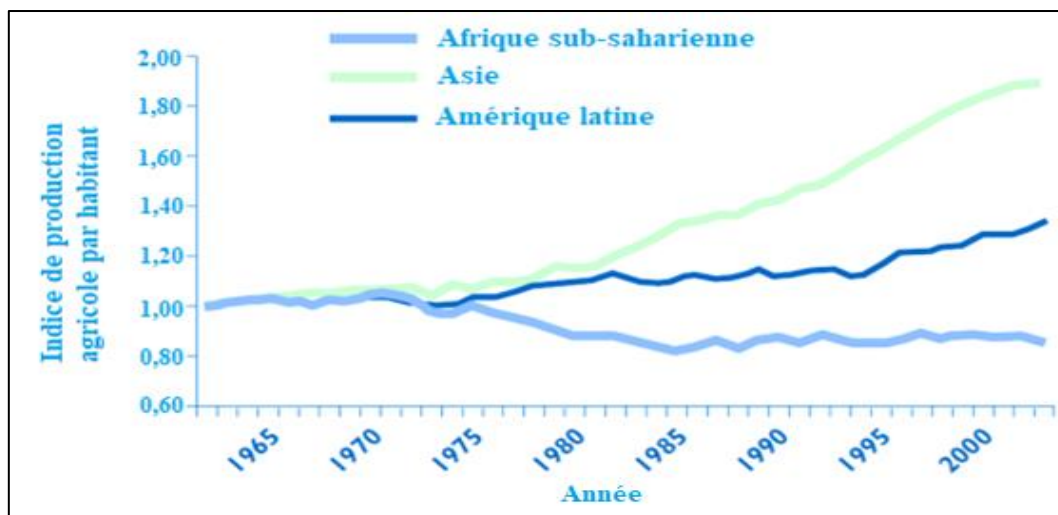


Figure 11 : Evolution de la production agricole par habitant et par région entre 1961 et 2002
Source : Haggblade et al. (2004)

2.4. Couplage sciences du climat et sciences agronomiques

Les très fortes répercussions des aléas climatiques sur l'agriculture et la sécurité alimentaire en Afrique sub-saharienne auxquelles se rajoute la perspective du changement climatique global ont poussé la communauté scientifique à orienter ses efforts vers le couplage entre le climat et l'agriculture. Les progrès en termes de compréhension et de prévision de la variabilité et des changements de la mousson en Afrique doivent être bénéfiques pour les sociétés (Janicot *et al.*, 2008). Cette approche doit tirer profit du progrès récent de développement continu, par les agronomes, de modèles de cultures mécanistes de plus en plus précis permettant d'analyser et de quantifier les facteurs abiotiques (édaphiques, climatiques et chimiques) sur la croissance et la production des plantes. Les progrès importants ont été accomplis par la communauté des climatologues dans le développement des modèles de circulation générale pour prévoir le climat que ce soit pour la saison à venir ou bien pour le siècle prochain. Bien que les deux outils aient été développés séparément, l'intérêt de coupler les modèles agronomiques aux modèles de climat apparaît alors de façon immédiate. Ainsi, cela peut permettre d'une part à l'échelle saisonnière, de prédire les rendements attendus des semaines voire des mois avant la récolte (Hansen *et al.*, 2006). A l'échelle pluri-décennale d'autre part, de réaliser des projections de la productivité agricole en réponse à l'évolution du climat (Roudier *et al.*, 2011b). Le couplage sciences agronomiques et climat n'est pas chose facile en raison du saut d'échelles entre les modèles agronomiques conçus à l'échelle de la parcelle et les modèles climatiques qui peinent à descendre à une échelle plus fine qu'une maille de plusieurs centaines de kilomètres de côté. Et de la très forte sensibilité des modèles agronomiques à la qualité du forçage climatique en entrée, très peu compatible avec les biais des modèles climatiques.

2.5. Variabilité hydroclimatique en Côte d'Ivoire

En Côte d'Ivoire, de nombreux auteurs se sont penchés sur la variabilité hydroclimatique. Il ressort de leurs investigations qu'à l'instar des grands bassins d'Afrique, les bassins versants de la Côte d'Ivoire n'ont pas échappé à la fluctuation climatique. En effet, selon Servat & Sakho (1995), Konan (2002) et Yao (2015) lors de leurs travaux sur la variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le bassin versant du Sassandra, ont révélé trois périodes d'apparition de ruptures. Il s'agit de la rupture localisée autour de l'année 1960. Cette période concerne les stations de Man et de Gagnoa, où la rupture est observée en 1966. La rupture localisée autour des années 1970 par Aka *et al.* (1996), Paturel *et al.* (1998), Servat *et al.* (1998) et Konan (2002) concerne les stations de Soubré (1970), Daloa (1971), Duékoué (1968) et Guiglo (1969). La rupture détectée autour des années 1980 par Konan (2002) et Ardoin-Bardin (2004) concerne les stations de Sassandra et d'Odienné. Ces ruptures ont entraîné des déficits pluviométriques qui varient entre 16% (Daloa) et 23% (Odienné). L'agriculture, l'alimentation des retenues et la production hydroélectrique sont fortement pénalisées par cette diminution de la pluviométrie (Brou, 2005). En effet, la simulation du fonctionnement du bassin versant du Sassandra en amont de Buyo révèle d'importantes chutes de production du barrage de Buyo. Les impacts des changements climatiques sur les écoulements du Sassandra pour les décennies à venir ont été simulés par Ardoin-Bardin (2004). Il ressort de cette étude, que le débit des rivières et la disponibilité en eau augmenteraient de 10% à 13% durant la première moitié du 21ème siècle (horizon 2050) avant de diminuer à l'horizon 2080 par rapport à la période de référence 1971-1995. En définitive, la variabilité et le changement climatiques ont un impact réel sur les ressources naturelles et en particulier sur les ressources en eau superficielle et souterraine. Au niveau de la zone d'étude, l'impact de la variabilité et du changement climatique sur les ressources en eau de surface sera donc mis en évidence. Selon les études de Kouassi *et al.* (2010) sur les manifestations de la variabilité climatique dans le bassin versant du N'Zi (Bandama) au centre de la Côte d'Ivoire, il ressort que les variations de l'humidité relative connaissent une baisse depuis l'année 1973 contre une hausse régulière des températures. Toujours selon les mêmes auteurs en 2017, le bassin versant du Bandama connaît une variabilité pluviométrique marquée par une longue période sèche amorcée à partir des années 1970. Une reprise de la tendance pluviométrique humide est caractérisée par la rupture des années 1999-2000 avec une récession des fréquences de jours pluvieux, une diminution de la durée des saisons pluvieuses et une dynamique spatio-temporelle. Cette baisse pluviométrique a entraîné le tarissement de la rivière N'Zi à partir de 1971 et le tarissement est plus accentué dans la région de Dimbokro (Fossou *et al.*, 2014). Adiaffi *et al.* (2016) lors de

l'analyse de la tendance d'évolution de la relation pluie-débit dans un contexte de variabilité climatique dans la région de Katiola, ont dégagé deux grandes périodes. Une période humide (1949 à 1970) et une période sèche (1971 à 2000). D'après les auteurs, les bassins versants du département de Katiola ont donc enregistré une diminution de quantité d'eau précipitée depuis la fin des années 1960. Contrairement à la baisse pluviométrique constatée au centre du pays, l'étude hydroclimatique de la région des Grand-ponts montre une fluctuation de régime pluviométrique et hydrologique avec des tendance de baisse intervenue au cours des années 1980 et 1983 (Blé *et al.*, 2021). Selon ces auteurs, bien que la fluctuation des régimes soit marquée par une alternance de périodes sèches, humides et normales, les ruptures sont accompagnées d'une hausse des précipitations allant de 8% à 19% et des débits d'environ 45%.

2.6. Variabilité hydroclimatique face aux enjeux socio-économiques

Les agrosystèmes sont fortement influencés dans le contexte de variabilité climatique (Briche *et al.*, 2010). Après une analyse comparative des températures de 1950 à 2100, ils ont indiqué que le bon déroulement des cycles végétatifs et des cultures est très influencé par les pèjorations thermiques. Pour Yegbemey *et al.* (2014), le climat est de plus en plus variable et fragilise les systèmes agricoles qui ne répondent plus favorablement au contexte climatique actuel. Amoussou *et al.* (2014) et Kodja (2018) ont montré que les grands aléas climatiques auxquels les populations sont vulnérables dans tous les continents et en particulier en Afrique de l'Ouest sont les évènements extrêmes (sécheresse, inondations), l'irrégularité des pluies, le réchauffement et l'élévation du niveau de la mer. De ces évènements, les plus récurrents sont la sécheresse et les inondations dans une Afrique marquée par une forte croissance démographique (Awotide *et al.*, 2015). Pour Panthou *et al.* (2012), les variations climatiques, comme la sécheresse et les inondations, ont des répercussions sur la disponibilité de l'eau, les activités socio-économiques, l'environnement, le sol, le dimensionnement des ouvrages hydrauliques et d'assainissement dans un monde enclin à une forte croissance démographique. L'impact de ces évènements n'est plus à démontrer dans les pays du Sahel (Gemenne *et al.*, 2014). Mahé & Olivry (1995), Bricquet *et al.* (1997) et Lebel & Ali (2009) ont démontré que le cumul pluviométrique annuel dans les pays du Sahel a atteint à peine 100 mm et que l'alternance des saisons est très marquée par des pluies de très courte durée (juin à septembre), ce qui a d'une part des répercussions sur la disponibilité de l'eau, affectant ainsi le régime hydrologique des bassins versants. D'autre part, l'agriculture qui représente non seulement plus de 30 % du produit intérieur brut, mais aussi la principale source de denrées alimentaires provient des zones rurales et emploie près de 60 % de la population dans la plupart des pays de

l'Afrique et surtout des régions touchées par la péjoration climatique. Il s'en suit donc des menaces sur la sécurité alimentaire. Alhassane *et al.* (2013) ont montré que les enjeux les plus vulnérables aux événements hydroclimatiques sont les systèmes humains environnementaux et les activités socio-économiques. Cette situation est beaucoup plus perceptible dans les pays de l'Afrique sub-saharienne où la plupart des populations vivent de l'agropastoralisme et dans les conditions précaires occupant les plaines d'inondation. D'après Kouassi *et al.* (2010), l'occurrence des extrêmes climatiques affecte les systèmes humains, environnementaux et socio-économiques en particulier dans les pays en voie de développement. L'ensemble des différentes études corrobore les conclusions du GIEC en 2007 que la variabilité et/ou changement climatique a des conséquences sur les écosystèmes et pourrait modifier les systèmes agricoles régionaux dans le temps et dans l'espace. C'est d'ailleurs ce qui montre que l'effet du réchauffement climatique et les événements hydroclimatiques vont s'aggraver avec des répercussions sans doute sur les systèmes humains et environnementaux.

Conclusion partielle

La sécheresse qui sévit en Afrique centrale et occidentale depuis un peu plus de trois décennies préoccupe la communauté scientifique. Plusieurs travaux concordent pour attester de l'ampleur de la variabilité des précipitations et de la gravité des conséquences sur les ressources en eau et sur les activités humaines. Depuis le début de la décennie 1970, l'ensemble des pays de l'Afrique soudano-sahélienne connaît une sécheresse chronique dont les années les plus catastrophiques ont été 1972-1974 et 1983-1984. La réalité de la persistance de la sécheresse depuis 1969-70 définit une phase climatique caractérisée par la forte diminution des quantités d'eau apportées par les précipitations, la migration vers le sud des isohyètes pour la décennie 1970-1980. Cette phase climatique entraîne une sahélisation des zones soudaniennes, la concentration des années exceptionnellement sèches depuis 1970. Les analyses statistiques ont mis en évidence une rupture dans les séries hydroclimatiques située autour de l'année 1970. Le phénomène est observé en zone soudano-sahélienne dès le début des années 1970. Mais c'est au début des années 1980 qu'il atteint significativement les régions d'Afrique dites humides, où son hétérogénéité spatiale est notable. Mais face au contexte de changement climatique, comment quantifier les ressources en eau de surface pour pérenniser la production de sucre ? Pour répondre à cette question, un ensemble de matériel et méthodes selon les objectifs spécifiques est nécessaire. La présentation de cet ensemble constitue l'objet de la seconde partie.

CHAPITRE 3 : GENERALITE SUR LA CANNE A SUCRE

3.1. Origine de la canne à sucre

La canne à sucre est originaire de la Papouasie Nouvelle Guinée, elle appartient à la famille des graminées et est classifiée sous le genre *saccharum*. Six espèces sont répertoriées, toutes des herbes pérennes connues de l'antiquité. Seules deux espèces, *S. spontaneum* et *S. robustum* poussent à l'état sauvage, les autres étant considérées comme espèces cultivées (Douared, 2004). La canne à sucre fournit plus des deux tiers de la production mondiale de sucre et est une des plantes les mieux adaptées pour la production de bioéthanol. Elle constitue la source exclusive de sucre pour les pays en développement. Dans ces pays, la consommation augmente régulièrement et la satisfaction des besoins est souvent une priorité nationale (Daugrois *et al*, 2007). La plante adulte est composée est nombreuses tiges aussi appelées talles. Comme pour les autres cultures graminacées, la récolte des repousses est possible. C'est le saccharose renfermé dans les tiges qui représente la richesse économique de la plante.

3.2. Description de la canne à sucre

La tige de canne à sucre atteint 2 à 5 m de hauteur pour un diamètre de 2 à 4 cm. Elle ne se ramifie pas au-dessus du sol mais les yeux souterrains donnent naissance à d'autres tiges. Une touffe de canne peut comporter 10 à 15 tiges. La tige se compose d'une succession de nœuds plus ligneux, où sont implantés les yeux (bourgeons) et d'entre nœuds gorgés de sucre, de couleur jaune, verte, rouge, violette ou brune selon la variété (Hamon *et al.*, 1999). La tige de la canne à sucre porte des feuilles à gaines enveloppantes, alternées atteignant 1 à 2 m de long et 3 à 8 cm de large. Les racines sont d'abord des racines de boutures qui naissent de l'anneau radiculaire de la bouture puis des racines de tige qui se développent en racines superficielles et ramifiées, racines de soutien plus profondes et racines cordons qui peuvent descendre jusqu'à 6 m. Après chaque coupe, un niveau système racinaire se constitue et l'ancien peut servir d'amendement.

3.3. Botanique de la canne à sucre

3.3.1. Classification systématique de la canne à sucre

- Règne : Plantae
 - Sous-règne : Tracheobionta (Plantes vasculaires)
 - Division : Magnoliophyta (Angiospermes)
 - Classe : Liliopsida (Monocotylédones)
 - Ordre : Poales
 - Famille : Poaceae (Graminées)

- Genre : *Saccharum L.*

3.3.2. Système racinaire de la canne à sucre

Le système racinaire de la canne à sucre est composé de deux sortes de racines qui se développent (Figure 12). Les racines de bouture qui sont des racines minces et très ramifiées qui se développent des primordia radiculaires dans la région de l'anneau radulaire de la bouture. La fonction principale de ces racines de bouture est de répondre aux besoins en eau et en nutriments de la jeune pousse (Gnopo, 2010). La durée de vie de ces racines est relativement courte 2 à 3 mois et par la suite leur fonction est reprise par les racines de la tige. Les racines de la tige sont issues des primordia radiculaires dans les anneaux radiculaires se trouvant à la base des tiges en plein développement. Elles sont blanches, épaisses et peu ramifiées.

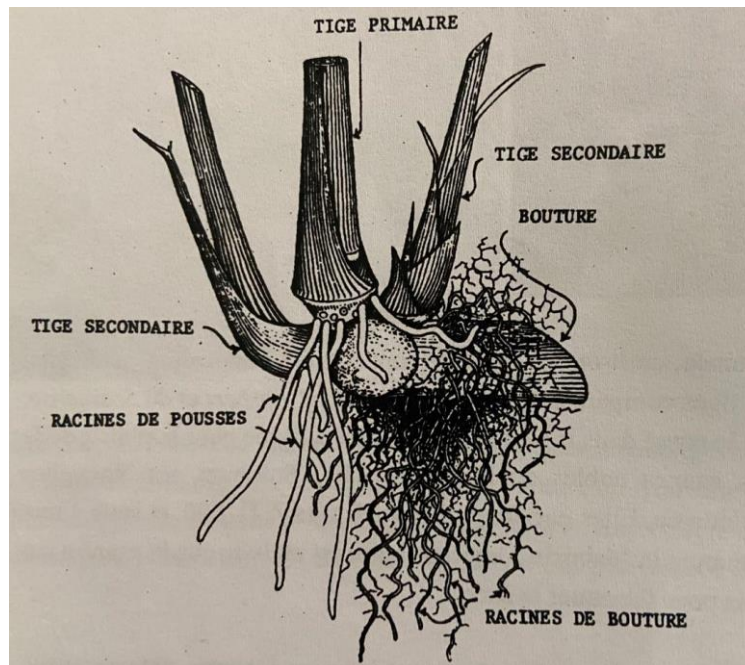


Figure 12 : Système racinaire d'une jeune plante

3.3.3. Différents types de racine de la canne à sucre

Dans la touffe de la plante de canne à sucre bien établie, trois types de racines se distinguent comme présenté par la figure 13. Les racines superficielles sont minces et ramifiées autour de la souche et les radicelles qui se développent sur les ramifications sont recouvertes de nombreux poils absorbants. Elles permettent à la plante d'absorber la majeure partie de ses besoins en eau et sels minéraux. Comme le nom l'implique, les racines superficielles ne puisent leurs éléments nutritifs que dans la couche supérieure du sol 15 à 20 cm. Les racines de soutien sont plus épaisses que les racines superficielles et pénètrent plus profondément et à un certain angle dans le sol. Même si l'on reconnaît que leur fonction principale est d'ancrer la plante dans le sol, elles peuvent aussi absorber de l'eau. Les racines du système cordon se développent en

profondeur et à la verticale dans le sol. En s'associant à plusieurs, elles forment des cordons. En période de sécheresse, elles peuvent alimenter la plante en eau, car elles peuvent la puiser à une plus grande profondeur (Gnopo, 2010).

La morphologie générale du système racinaire diffère selon les variétés et parfois au sein d'une seule et même variété dépendant des conditions du sol.

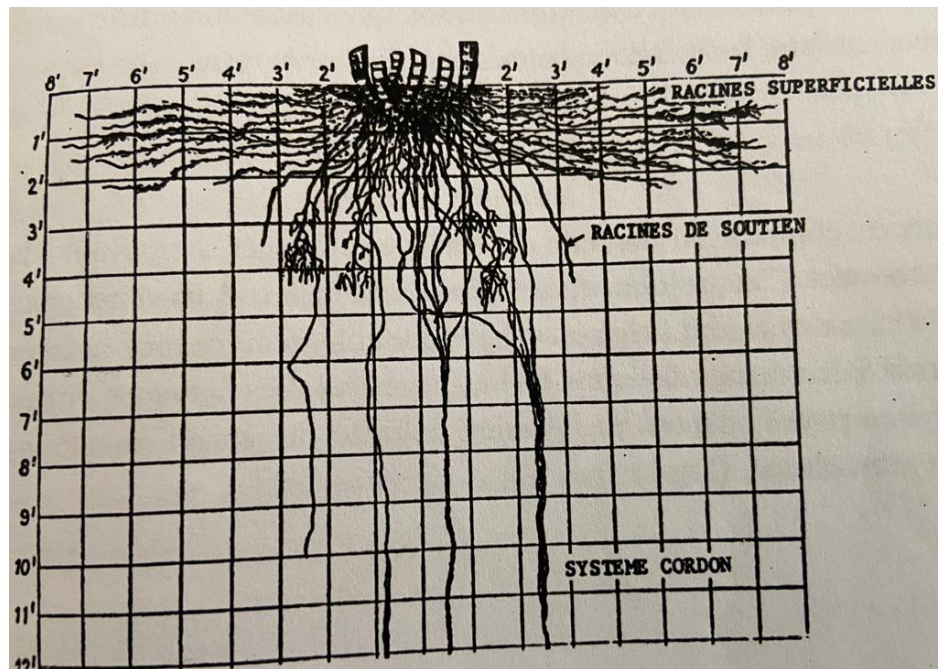


Figure 13 : Différents types de racine de la canne à sucre

3.3.4. Tige de la canne à sucre

La tige de la canne à sucre est composée d'une série de joints dont les plus âgés se trouvent à la base et les plus jeunes au sommet. Chaque joint végétatif comprend un nœud, un entre-nœud, et une feuille attachée à la base du nœud (Figure 14). La tige est cylindrique et les feuilles sont insérées alternativement, en formant ainsi deux rangs distiques. La longueur finale des tiges au moment de la récolte varie et dépend de la variété cultivée, des conditions climatiques aussi bien que du cycle cultural. La forme et la couleur des tiges peuvent être différentes. Quatre formes de tige ont été couramment décrites. Ce sont les tiges en forme de cylindre, de tonneau, de bobine et coudée. Les tiges peuvent être de toutes les nuances, du vert, jaune et rouge, et parfois même d'un rouge violacé. Dans certains cas l'entrenœud peut être strié ou avoir des plaques subéreuses. Chez certaines variétés, on retrouve un sillon partant au-dessus du bourgeon latéral et s'étendant tout le long de l'entrenœud selon du bourgeon. Un bourgeon latéral ou œilleton se trouve dans la région de l'anneau radulaire de chaque entre nœud, sauf dans le cas des trois ou quatre nœuds précédant l'inflorescence dans les tiges florales. La forme et la dimension des œilletons varient selon les variétés et peuvent servir à leur identification.

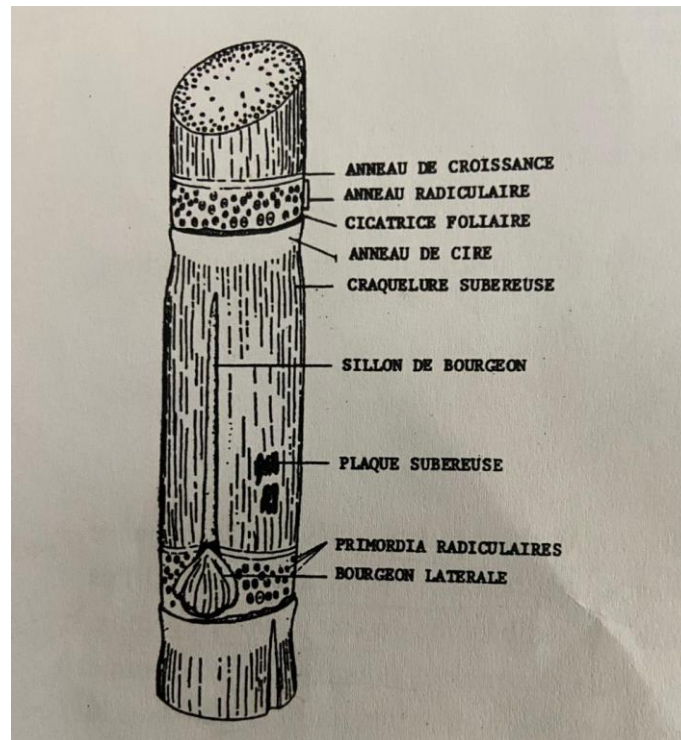


Figure 14 : Morceau de tige de canne à sucre

3.3.5. Feuille de la canne à sucre

Les feuilles de la plante de canne à sucre sont insérées alternativement sur les nœuds et en rangs opposés. Chaque feuille comprend deux parties : la gaine et le limbe (Figure 15). La gaine est la partie inférieure de la feuille de la plante de canne à sucre, tubulaire et entoure l'entrenœud. La base, les bords se chevauchent et elle peut être pubescente sur sa face externe. Des auricules, appendices en forme d'oreilles, se trouvent parfois sur le bord supérieur de la gaine. La morphologie des 6 ou 8 feuilles de l'extrémité supérieure d'une hampe florale est différente de celle des feuilles du bas de la tige, correspond au stade végétatif. La feuille la plus haute de la hampe florale est appelée feuille pavillon. Elle a une gaine très longue et un limbe très étroit. Mais les feuilles au-dessous d'elle ont des gaines plus courtes et des limbes plus longs et plus étalés. Ainsi, à mesure qu'on descend, on voit des feuilles avec des gaines de plus en plus courtes et des limbes de plus en plus longs. C'est ce qui explique aussi que les feuilles supérieures d'une hampe florale seraient plus éloignées les unes des autres.

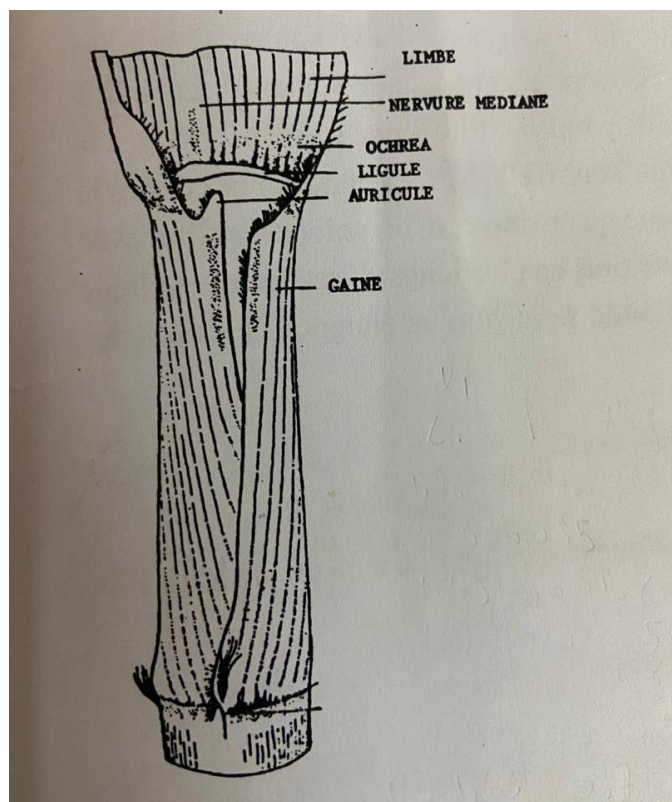


Figure 15 : Feuille de la canne à sucre

3.4. Cycle végétatif de la canne à sucre

La multiplication de la canne à sucre se fait par boutures. On distingue les phases successives suivantes qui sont d'abord la phase de reprise qui intervient 2 à 4 semaines après la mise en terre des boutures (planting), les premières tiges apparaissent. Ensuite vient la phase de tallage qui dure entre 2 et 3 mois. La phase de tallage est suivie de la phase d'élongation et de croissance qui dure entre 5 à 7 mois environ. Cette phase a surtout lieu pendant la période de chaleur et de grosses pluies. Enfin la phase de maturation qui dure en moyenne 6 mois après l'arrêt de croissance de la canne. La période de maturation correspond à une période froide avec de faibles pluies. La récolte (coupe) des cannes intervient à partir du 12^{ème} mois après le planting des boutures. Cette coupe termine le 1^{er} cycle végétatif de la canne à sucre. Le cycle végétatif de la canne à sucre peut durer de très nombreuses années si les conditions du milieu sont favorables.

3.5. Condition pédoclimatique de culture de la canne à sucre

Le cycle cultural harmonieux de la canne est étroitement conditionné par le climat. L'eau et la chaleur sont favorables à la croissance tandis que la sécheresse et le froid surtout nocturne sont favorables à la maturation. Les températures optimales diurnes pour la germination se situent entre 26 et 33°C, alors que les températures propices à une bonne croissance sont de 28 à 35°C. Les plantes de canne à sucre tolèrent des températures minimales de croissance de 15 à 18°C.

Au stade végétatif, la plante de canne à sucre a besoin de 100 à 170 mm d'eau par mois suivant les conditions climatiques. Mais sur le cycle cultural, 1000 à 2000 mm d'eau par année sont nécessaires pour le développement des plantes. Une saison sèche marquée de 2 à 3 mois correspondant à la période de maturation des cannes ; alors que pendant les 8 à 9 premiers mois qui correspondent à la période de croissance nécessite des quantités importantes d'eau. La canne à sucre exige beaucoup de lumière tant pour sa croissance que pour la formation du saccharose (Douared, 2004). Les cannes cultivées en pleine lumière ont des tiges plus grosses et plus trapues, des feuilles plus larges, plus épaisses et plus vertes, des racines plus développées. La lumière facilite la maturation des cannes en permettant à l'eau de constitution de se réduire en quantité. La floraison ne peut avoir lieu en présence de lumière. Les plantes de canne à sucre poussent sur des sols très divers, pourvu qu'ils soient profonds, meubles, riches en humus, en éléments fertilisants et suffisamment humides. Les meilleurs sols semblent être ceux qui proviennent de la dégradation des basaltes et les alluvions profondes. En ce qui concerne le pH, la canne à sucre demande une légère alcalinité variant de 7 à 7,5.

3.6. Physiologie de la canne à sucre

En physiologie végétale, les principaux processus majeurs concernent la pousse et le développement qui contrôlent la productivité. Ces processus sont l'absorption de l'eau, des sels minéraux et le transport des produits finis dans la plante.

3.6.1. Absorption de l'eau

L'eau peut être considérée comme étant la principale constituante des plantes. Les jeunes tissus d'une plante de canne peuvent renfermer jusqu'à 85 à 90 % d'eau alors que les entrenœuds murs ne contiennent qu'entre 65 et 70%. L'eau dans les tissus des plantes est essentielle pour de nombreux processus physiologiques y compris le transport des solutés. Ce n'est qu'une toute petite partie de l'eau absorbée par la plante qui se fixe pour la formation de la matière sèche. Le reste étant rejeté à travers la transpiration. Ainsi, l'irrigation est importante dans les régions où l'on enregistre moins de 1250 mm de pluie par an.

3.6.2. Absorption des minéraux

Les minéraux sont extraits du sol par l'eau entourant des racines. L'absorption se fait en majeure partie dans la région de poils radiculaires. Les éléments minéraux existent sous forme de sel en solution qui se dissocient en ions et qui migrent librement. L'absorption des ions par les racines se fait par une combinaison d'absorption passive quand les ions pénètrent par diffusion libre à travers l'apoplasme et aussi par le transport actif des ions contre un gradient de concentration

en utilisant l'énergie de la respiration. Le principal point utilisateur de ces éléments minéraux par la canne à sucre est la zone de croissance. Le phosphore circule continuellement et rapidement dans le système du xylème et du phloème des plantes. D'autres éléments tels le calcium et le soufre sont moins mobiles. Le mouvement de minéraux est sous l'influence des substances de croissance, notamment les cytokinines. Les éléments les plus mobiles sont l'azote, le potassium, le phosphore et le soufre.

3.6.3. Transpiration

L'eau rejetée par la transpiration varie pendant la journée et suivant l'âge de la plante. Le taux de transpirations augmente rapidement à partir de la germination ou de la récolte pour les cas de repousse jusqu'au moment où la couverture maximale du sol est atteinte. A partir de ce moment, l'augmentation du taux d'évaporation est plus lente et atteint son apogée à l'âge de six à sept mois. Des expériences faites démontrent que le rapport moyen entre la transpiration diurne et nocturne varie fortement. Les taux d'évaporation et de rétention d'eau dans le sol servent à calculer la balance journalière ou hebdomadaire des besoins en eau de la culture. L'évapotranspiration est toutefois en fonction du stade de développement. L'évaporation de la canne à sucre est égale à l'évaporation après la couverture maximale, atteinte quand la plante a autour de six à sept mois d'âge. Ce stade peut varier légèrement selon les variétés. Pendant les six premiers mois, la production des talles et leurs survies sont les caractéristiques dominantes du développement de la plante. Ainsi, une sous irrigation pendant cette phase de tallage peut influencer le nombre de talles qui survivront avec des effets subséquents sur la durée de la phase d'élongation.

3.7. Croissance et développement de la canne à sucre

3.7.1. Levée de la canne à sucre

La germination des boutures correspond au développement du bourgeon renfermé dans les écailles de l'oreille. Ce développement aussi bien que la pousse des racines de boutures dépend de l'état de la bouture ainsi que ces facteurs environnants qui sont l'humidité et la température. La balance hormonale, la disponibilité des composants azotés solubles et des sucres simples, représentent les facteurs de la plante. Le taux d'humidité de la bouture est généralement autour de 70%. Des résultats ont démontré qu'un surplus d'engrais azoté ainsi qu'une irrigation adéquate apportée avant la préparation des boutures, favorisent la levée des œilletons. Généralement les boutures provenant des entre-nœuds supérieurs germent plus rapidement. Les facteurs externes, la température et l'humidité sont les plus importantes. Il est généralement admis que la température optimum se situe entre 27 et 33°C. L'humidité du sol devient critique

aussitôt que les racines de boutures se sont développées, particulièrement dans la partie supérieure du sol. Un sol gorgé d'eau affectera la germination en raison des conditions limitant la respiration, tandis que des conditions de sécheresse influenceront le développement subséquent des tiges aussi bien que leurs racines.

3.7.2. Tallage de la canne à sucre

Le tallage représente la seconde phase de développement de la canne à sucre. Son évolution et sa durée influencent la phase suivante et éventuellement le rendement final. Les caractéristiques des variétés, mis à part le tallage, est sous l'influence de la lumière, l'humidité, la température, les éléments nutritifs et l'espacement. Sous des conditions de faible rayonnement, de basse température ou de sécheresse, un ralentissement de l'émergence des talles est observé. Les jeunes pousses émergentes sont faibles et plus exposées aux maladies et aux insectes nuisibles, tel le Borer de la canne à sucre. La température optimale pour l'émergence des talles est autour de 30°C. Une température diurne en dessous de 18°C peut considérablement allonger la phase de tallage. L'azote et le phosphore favorisent le tallage, mais on ne connaît pas le seuil critique en dessous duquel le tallage serait compromis pour un sol donné. Cependant des apports d'azote peuvent influencer non seulement la production des talles, mais aussi la survie de celles-ci, car seules les tiges poussantes vigoureusement vont finalement survivre.

3.7.3. Élongation et croissance de la canne à sucre

La période d'élongation des jeunes tiges de canne à sucre est souvent considérée comme étant la grande période de pousse. L'élongation de la tige est directement proportionnelle à la température ambiante, avec le point zéro aux alentours de 23°C. La température peut être favorable mais la disponibilité de l'eau dans le sol reste le facteur limitant. Sous des conditions où la température de l'air est bien supérieure à celle du sol, l'influence de cette dernière ne peut être négliger sur le taux d'élongation. En dessous de 21°C, la température du sol restreint la croissance de la canne et aucune croissance n'est observée sous les 10°C. La production des joints et l'élongation de la tige ont lieu simultanément. Une relation linéaire existe entre les températures dans la fourchette de 13 à 23°C et la réciproque de la vitesse de formation des nœuds. Ainsi, le rendement dépend dans une grande mesure de cette phase d'élongation. Toute politique visant à tirer le maximum de celle-ci, avec pour but de maximiser le rendement, devrait faire coïncider la grande période de pousse avec les conditions climatiques les plus favorables.

3.7.4. Maturation de la canne à sucre

3.7.4.1. Maturation naturelle

Pendant la maturation, il y a une augmentation de la teneur en saccharose de la tige de canne à sucre. Le taux de saccharose peut être exprimé par rapport au poids frais ou à celui de la matière sèche. L'interprétation du taux de saccharose par rapport au poids frais nécessite de sérieuses précautions. Ainsi, la dessiccation ou perte en eau de la tige entraînerait une augmentation de la teneur en saccharose exprimée en pourcentage du poids frais comme démontré ci-dessous, sans qu'il y ait une augmentation réelle de la qualité de saccharose récoltable.

3.7.4.2. Maturation artificielle

Les produits tels le Glyphosate, l'Ethrel et le Fusillade Forte sont couramment utilisés à l'échelle industrielle pour induire la maturation de la canne à sucre. Dans certains cas une combinaison d'Ethrel et de Glyphosate ou de Fusillade forte est utilisée. Les aspects suivants du mûrissement chimique devraient être étudiés avant de s'embarquer sur le traitement.

3.8. Changement climatique et production de la canne à sucre

3.8.1. Enjeux liés au changement climatique pour la culture de la canne à sucre

La culture de la canne à sucre est un pilier économique pour de nombreux pays tropicaux, fournissant non seulement du sucre pour la consommation humaine, mais aussi des biocarburants, des aliments et des litières pour animaux et des produits dérivés industriels. La canne à sucre est actuellement cultivée sur environ 26 Mha de terres agricoles à l'échelle mondiale, employant des millions de personnes dans les secteurs de la culture, du transport, de la transformation et de la distribution (Alexia *et al.*, 2025). Face à une demande croissante, les zones de culture sont en extension (Tongwane *et al.*, 2016). Le changement climatique constitue une menace sérieuse pour la filière canne à sucre, mais les conséquences attendues varient fortement en fonction des zones concernées (Linnenluecke *et al.*, 2018). Ces enjeux sont nombreux : les variations des régimes de précipitations, l'augmentation des températures, la hausse du niveau de la mer dans les zones côtières et la fréquence accrue des événements climatiques extrêmes comme les cyclones et les inondations (Warren *et al.*, 2024). Les études ont montré des projections contrastées selon les zones climatiques, en raison de la combinaison de conditions favorables pour les cultures (augmentation de la température et du CO₂) et de régimes de précipitations défavorables. En effet, la canne à sucre nécessite des conditions climatiques spécifiques pour croître de manière optimale. Elle prospère dans des régions où les précipitations sont abondantes, idéalement supérieures à 1500 mm par an, et où les températures moyennes journalières se situent entre 22°C et 30°C. Les sols bien drainés et fertiles sont

également essentiels pour des rendements élevés. Toutefois, l'augmentation des températures moyennes et la variabilité accrue des précipitations rendent plus difficile la gestion des cultures et compromettent la stabilité des rendements.

3.8.2. Impact du changement climatique sur la culture de la canne à sucre

Les impacts du changement climatique sur la canne à sucre sont multiples et variés. La modification des régimes de précipitations peut entraîner des périodes de sécheresse plus fréquentes et plus sévères (Carvalho et al., 2015), affectant la croissance de la canne à sucre qui nécessite des apports d'eau réguliers pour maximiser les rendements (Jones et al., 2015). Une bonne gestion de l'irrigation pourrait d'ailleurs permettre d'augmenter les rendements dans de nombreuses régions (Linnenluecke et al., 2018). Néanmoins, la diminution des précipitations et l'augmentation de l'évapotranspiration due à des températures plus élevées réduisent la disponibilité de l'eau douce, aggravant la concurrence pour cette ressource entre l'agriculture, les usages domestiques et industriels et encore plus dans le cadre d'une demande d'amélioration de la qualité des eaux. L'augmentation des températures pose également un défi de taille. La maturation de la canne (accumulation du sucre dans les tiges) est perturbée par une chaleur excessive, notamment par l'augmentation des minimales nocturnes. De plus, des températures et des humidités plus élevées favorisent la prolifération de parasites et de maladies, comme la rouille brune de la canne à sucre ou les adventices, qui peuvent nuire à la production (Goebel et Sallam, 2011). Néanmoins, l'augmentation des températures est davantage vue comme bénéfique pour la culture de canne dans de nombreuses régions, sous condition de disponibilité en eau satisfaisante. L'augmentation du niveau de la mer pourrait également exercer une pression croissante sur les surfaces de production de canne à sucre (Warren et al., 2024). Les zones côtières, où la canne à sucre est souvent cultivée en raison de leurs sols fertiles et de leur climat favorable, sont particulièrement vulnérables aux inondations favorisées par la montée des eaux. La canne à sucre est une culture sensible aux inondations, entraînant la pourriture des racines et une réduction de la qualité et de la quantité des récoltes (Gomathi et al., 2015). Une élévation du niveau de la mer peut également entraîner une salinisation accrue des sols, rendant les terres agricoles moins productives ou même infertiles.

Conclusion partielle

La canne à sucre est une plante connue depuis bien longtemps apparue à la Papouasie Nouvelle Guinée. Elle appartient à la famille des graminées sous le genre *Saccharum*. La plante de canne à sucre se développe sous un climat tropical avec des températures comprises entre 26 et 35°C. Le besoin global en eau pour un cycle végétatif est de 1500 mm d'eau. Le saccharose refermé dans les tiges de canne à sucre représente sa richesse économique.

PARTIE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES

CHAPITRE 4 : MATÉRIEL

Ce chapitre présente les données et les logiciels qui sont utilisés dans cette étude. Il présente également les différents modes d'acquisition de ces données ainsi que leurs sources.

4.1. Données

Les données utilisées se composent de données climatiques, hydrométriques, agronomiques, télédétections et cartographiques.

4.1.1. Données climatiques

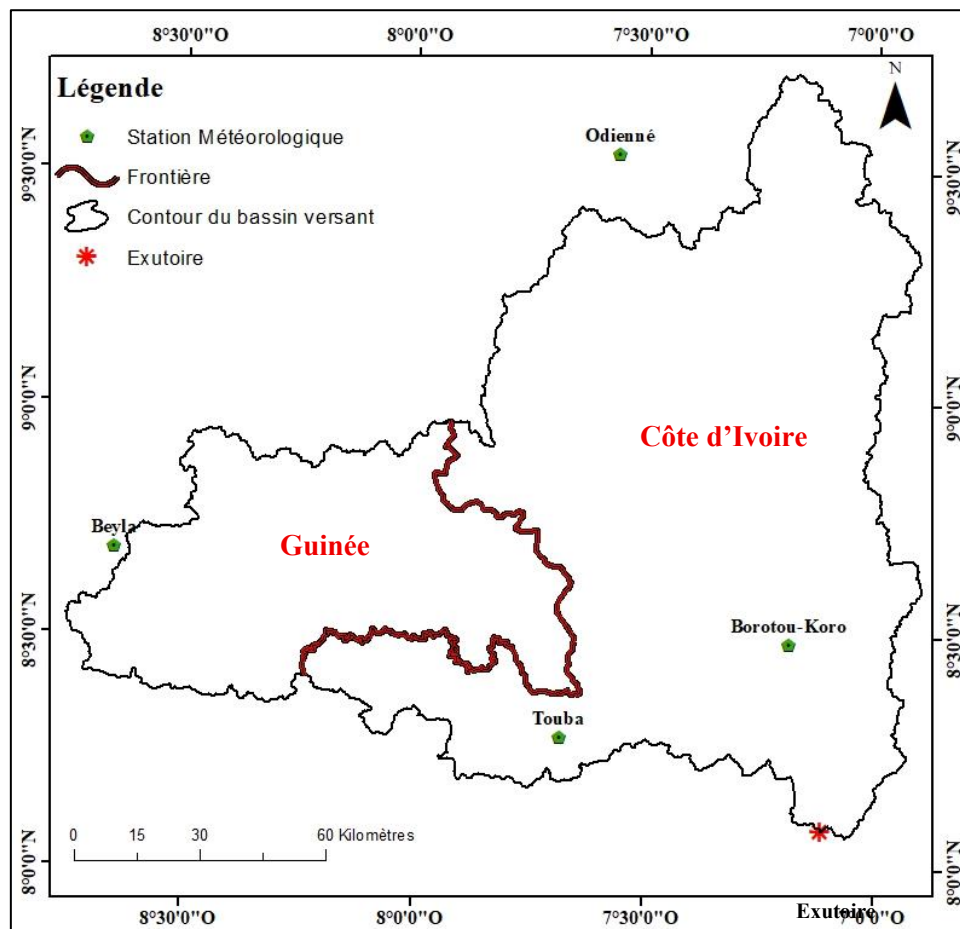
Les données climatiques sont de deux types : les mesures *in situ* des stations synoptiques existant sur le territoire du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona et à sa périphérie immédiate, qualifiées de "**données observées**" et les données extraites des modèles climatiques couvrant le bassin, qualifiées de "**données simulées**".

❖ Données climatiques observées

Les chroniques de pluies et de températures utilisées sont issues des stations synoptiques de Touba, Borotou-Koro et Odienné (territoire ivoirien) et de Beyla (territoire guinéen) (Figure 16). En territoire ivoirien, les données de pluies et de températures sont fournies au pas de temps journalier sur la période 1970-2021 par la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) pour les stations climatiques de Touba et Odienné et le Service des Etudes Agronomiques (SEA) de la société agro-alimentaire Sucrivoire pour la station climatique de Borotou-Koro. En territoire guinéen, ces données sont fournies également au pas de temps journalier, mais sur la période 1971-2020 par la Direction Nationale de la Météorologie Guinéenne (DNMG). Les données d'évapotranspiration proviennent uniquement de la station de Borotou-Koro. L'ensemble des données présente des lacunes de moins de 3%. Le tableau II présente les caractéristiques générales de toutes les données aux différentes stations.

Tableau II : Description synoptique des données des stations climatiques retenues pour l'étude

| Pays d'origine de la station | Nom de la station | Chronique disponible | Pas de temps | Pourcentage de lacune |
|------------------------------|-------------------|----------------------|--------------|-----------------------|
| Données de pluie | | | | |
| Côte d'Ivoire | Borotou-Koro | 1970-2021 | Journalier | 0 % |
| | Odienné | | | 1 % |
| | Touba | 1970-2020 | | 1 % |
| Guinée | Beyla | | | 2 % |
| Données de température | | | | |
| Côte d'Ivoire | Borotou-Koro | 1970-2021 | Journalier | 0 % |
| | Odienné | | | 1 % |
| | Touba | 1970-2020 | | 1 % |
| Guinée | Beyla | | | 2 % |
| Données d'évapotranspiration | | | | |
| Côte d'Ivoire | Borotou-Koro | 1970-2021 | Journalier | 0 % |

**Figure 16:** Carte de la répartition spatiale des stations météorologiques dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

❖ Données climatiques simulées

Les données climatiques simulées sont composées de données de pluie et de température. Ces données sont issues de trois Modèles Climatiques Régionaux (MCR) de résolution spatiale d'environ 50 km (0,44° x 0,44°). Il s'agit des modèles RACMO22T, RCA4 et REMO2009, acquis suivant deux scénarios de profils représentatifs d'évolution des concentrations ou "Representative Concentration Pathways (RCP)", à savoir : RCP4.5 et RCP8.5. Les données extraites desdits modèles proviennent du programme dénommé "Cordinated Climate Downscaling Experiment (CORDEX Afrique)" au pas de temps journalier sur la période de 2021 à 2026. Elles sont téléchargeables sur le site du "World Data Center for Climate (wdc-climate.de)". L'origine de ces modèles est indiquée dans le tableau III.

Tableau III : Modèles climatiques et leurs origines

| Modèles | Institut | Pays |
|------------------------------|----------|---------|
| RACMO22T (ICHEC-EC-EARTH) | ICHEC | Irlande |
| RCA44 (ICHEC-EC-EARTH) | ICHEC | Irlande |
| REMO2009 (IPSL-IPSL-CM5A-MR) | IPSL | France |

Source : www.cordex.org

4.1.2. Données agronomiques

Les données agronomiques ont été acquises auprès du Service des Etudes Agronomiques (SEA) et la direction des plantations de Sucrivoire. Elles concernent les quantités d'eau apportées aux plantes de canne à sucre chaque mois, les variétés de canne à sucre cultivées par campagne, les dates de plantation des cannes (mise en terre ou planting), les dates de coupes des cannes (récolte), les superficies des parcelles agricoles exploitées, les productions et les rendements. Ces données concernent les campagnes agricoles de 2012 à 2020.

4.1.3. Données hydrométriques

Les données hydrométriques ont été obtenues auprès de la Sous-Direction de l'hydrologie, structure sous tutelle de la Direction de l'Hydraulique Humaine (DHH). Elles sont mises à disposition au pas de temps journalier sur la période 1970-2020. Les niveaux d'eau de la rivière Bagbè aux trois stations de pompage ont été fournis par le service irrigation de la direction des plantations de Sucrivoire au pas de temps journalier sur la période 2001-2021. Ces niveaux d'eau sont lus sur des échelles limnimétriques. Par ailleurs, la figure 17 situe les différentes stations hydrométriques fonctionnelles dans le bassin versant. Les débits de la station de Sorotona ont été utilisés dans cette étude, parce qu'elle présente une bonne série de données (1970-2020), avec un taux de lacune inférieur à 5% (Tableau IV). Alors que pour les autres

stations, les chroniques de données s'arrêtent en 2002 du fait de la crise survenue en Côte d'Ivoire.

Tableau IV : Description synoptique des données des stations hydrométriques dans le bassin versant

| Stations | Coordonnée | | Chronique | | Pourcentage de lacune |
|-----------------|------------|-----------|-----------|------|-----------------------|
| | Latitude | Longitude | Début | Fin | |
| Sorotona | 8,07 | -7,10 | 1961 | 2020 | 2 % |
| N'Golodougou | 8,32 | -7,63 | 1975 | 2002 | > 5% |
| Vialadougou | 8,53 | -7,19 | 1983 | 2002 | >5% |
| Dabala | 8,42 | -7,16 | 1975 | 2002 | >5% |
| Dioulatiedougou | 8,97 | -7,23 | 1975 | 2002 | >5% |
| Massadougou | 9,10 | -7,38 | 1975 | 2002 | >5% |

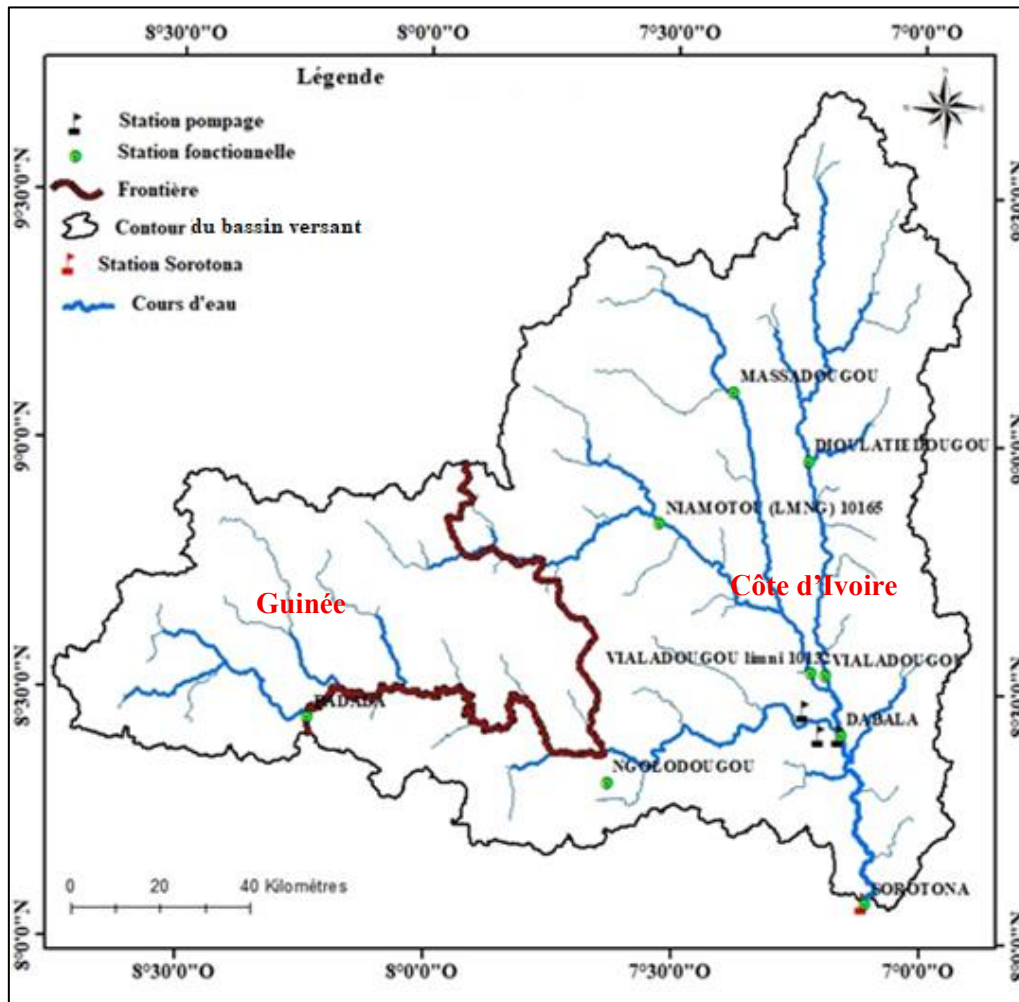


Figure 17 : Carte de la répartition des stations hydrométriques dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona.

4.1.4. Données de télédétection

Les images satellitaires utilisées se composent d'images Landsat et d'images d'élévation ASTER-GDEM4.

4.1.4.1. Images satellitaires Landsat

Les images Landsat sont de trois types, issues des capteurs : Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) et Operational Land Imager Thermal Infrared Sensor (OLI-TIRS). Les scènes utilisées sont les scènes 198-053, 198-054, 199-053 et 199-054 de janvier 1986 pour les images TM, janvier 2003 pour les images ETM+ et février 2020 pour les images OLI-TIRS. Le tableau V donne un descriptif succinct desdits capteurs.

Tableau V : Caractéristiques des images satellitaires Landsat

| Images | Date d'acquisition | Path | Row | Capteur | Bandes spectrales | Format Image |
|--------|--------------------|------|-----|----------|-------------------|--------------|
| 1986 | 07-janv-86 | 198 | 53 | TM | 7 | |
| | 07-janv-86 | | 54 | | | |
| | 14-janv-86 | 199 | 53 | | | |
| | 14-janv-86 | | 54 | | | |
| 2003 | 14-janv-03 | 198 | 53 | ETM+ | 8 | GEOTIFF |
| | 14-janv-03 | | 54 | | | |
| | 05-janv-03 | 199 | 53 | | | |
| | 05-janv-03 | | 54 | | | |
| 2020 | 11-févr-20 | 198 | 53 | OLI-TIRS | 11 | |
| | 11-févr-20 | | 54 | | | |
| | 25-févr-20 | 199 | 53 | | | |
| | 25-févr-20 | | 54 | | | |

Le tableau VI présente les caractéristiques des différentes bandes qui constituent une image Landsat.

Tableau VI: Description des bandes des images satellitaires

| Bandes spectrales | Désignation | Longueur d'ondes (μm) | Résolution (m) | Satellites |
|-------------------|----------------------|------------------------------------|----------------|-------------------------------------|
| Bande 1 | Bleu | 0,450 – 0,515 | 30 | Landsat 5 Landsat 7 Landsat 8 |
| Bande 2 | Vert | 0,525 – 0,600 | 30 | |
| Bande 3 | Rouge | 0,630 – 0,680 | 30 | |
| Bande 4 | Infrarouge proche | 0,845 – 0,885 | 30 | |
| Bande 5 | Infrarouge Moyen | 1,560 – 1,660 | 30 | |
| Bande 6 | Infrarouge Moyen | 2,100 – 2,300 | 30 | |
| Bande 7 | Panchromatique | 0,500 – 0,680 | 30 | |
| Bande 8 | Cirrus | 1,360 – 1,390 | 15 | |
| Bande 9 | Infrarouge Thermique | 10,30 – 11,30 | 100 | |
| Bande 10 | Infrarouge Thermique | 11,50 – 12,50 | 100 | |

4.1.4.2. Données images ASTER

En complément des images satellitaires, le modèle numérique de terrain (MNT) du bassin versant a été employé. Ce MNT est issu de la base de données ASTER-GDEM4 fournie par l'ERSDAC, présentant une résolution spatiale d'environ 30 mètres. Il a été téléchargé à partir du site <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp>. Ce modèle a permis d'extraire et délimiter le bassin versant, et de générer les cartes des pentes, du relief et du réseau hydrographique.

4.2. Logiciels utilisés

Plusieurs logiciels ont été utilisés dans le cadre de cette étude. Il s'agit de :

- ArcGIS 10.5, logiciel SIG (Système d'Information Géographique) d'ESRI (Environmental System Research Institute) utilisé pour la réalisation des cartes thématiques ;
- RStudio, utilisé pour générer les différents indices météorologiques et hydrologiques ;
- R-Instat, utilisé pour déterminer des paramètres agroclimatiques dans le bassin versant ;
- CMhyd, ayant servi à corriger les biais des données de sortie des modèles climatiques ;
- Envi 5.3, utilisé pour le traitement des images et réaliser les cartes d'occupation du sol du bassin versant ;
- Land Change Modeler (LCM) est utilisé pour modéliser l'occupation du sol future dans le bassin versant ;
- CEQUEAU 4.0, utilisé pour évaluer les écoulements futurs dans le bassin versant face au changement climatique et au changement d'occupation du sol ;
- Mapinfo10, utilisé pour numériser de la végétation, le relief et le réseau hydrographique. Il a surtout servi à mailler le bassin versant et à déterminer les données physiographiques utilisées au fonctionnement du modèle hydrologique CEQUEAU.

Conclusion partielle

Les données sollicitées pour cette étude sont de quatre types. Il s'agit des données climatiques, des données agronomiques, des données hydrométriques et des données images. Les premières données ont permis de caractériser le climat dans le bassin versant. Les données agronomiques ont permis de déterminer les besoins hydriques des plantes de canne à sucre et des besoins en eau d'irrigation sur l'ensemble de l'exploitation agricole. Quant aux données hydrométriques, elles ont permis de quantifier les volumes d'eau mobilisable pour la satisfaction des besoins hydriques de l'exploitation. Les images ont permis de mettre en évidence la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant. Les données hydrométéorologiques ont permis de simuler les débits futurs à l'aide du modèles hydrologique CEQUEAU.

CHAPITRE 5 : MÉTHODES

Ce chapitre décrit les approches méthodologiques utilisées pour atteindre les différents objectifs spécifiques définis. Il se décline en trois étapes à savoir : la caractérisation des paramètres agroclimatiques, l'évaluation de la disponibilité de l'eau dans le complexe sucrier et l'étude du rapport entre les besoins et la disponibilité de l'eau.

5.1. Caractérisation des paramètres agroclimatiques du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

5.1.1. Détermination des paramètres agroclimatiques du bassin versant

Les paramètres agroclimatiques ici étudiés sont : Début de la saison des pluies (DSP), Fin de la saison des pluies (FSP), Longueur de la saison des pluies (LSP), Nombre de jours de pluie (NJP), Cumul de précipitation saisonnière (CPS), Hauteur journalière moyenne de précipitation (HMP), Séquences sèches saisonnières (SS).

5.1.1.1. Début de la saison des pluies (DSP)

La détermination du début de la saison des pluies (DSP) repose sur deux éléments fondamentaux. D'une part, l'abondance des précipitations, caractérisée par une quantité significative d'eau, et d'autre part, la dynamique pluviale, qui se manifeste par une alternance de jours humides et secs. Ces deux dimensions sont régies par des seuils pluviométriques établis afin d'assurer la disponibilité en eau essentielle pour les plantes durant leur phase végétative, prévenant ainsi le flétrissement des végétaux et la perte des récoltes (Walter, 1967 ; Omotosho *et al.*, 2000). Les agro-climatologues s'accordent à définir le commencement de la saison des pluies en s'appuyant sur divers seuils empiriques (Sivakumar, 1988 ; Moron *et al.*, 2009 ; Goula *et al.*, 2010). Généralement, le début de cette saison est identifié par le premier jour pluvieux au sein d'une séquence humide d'une durée de N jours ayant reçu une quantité de pluie P (mm), sans qu'il ne soit suivi d'une période sèche de k jours enregistrant moins de X (mm) de précipitations durant une période subséquente de C jours. Pour les objectifs de cette étude, les DSP sont définis selon la conception agroclimatique proposée par Sivakumar (1988) pour l'Afrique de l'Ouest. Les seuils empiriques adaptés par Sarr (2007) ainsi que Goula *et al.* (2010), prenant en compte les conditions climatiques spécifiques à la Côte d'Ivoire, ont été appliqués. Ces chercheurs avancent que le commencement de la saison des pluies est déterminé au 1er avril, moment où l'on observe un cumul d'au moins 20 mm de précipitations sur une période continue de trois (3) jours, sans qu'il y ait eu d'épisodes secs dépassant sept (7) jours au cours des trente (30) jours suivant cette date.

En conséquence, pour chacune des stations météorologiques, les dates de début de la saison des pluies sont définies en accord avec cette définition agroclimatique.

5.1.1.2. Fin de la saison des pluies (FSP)

La fin de la saison des pluies représente un facteur essentiel parmi les variables agroclimatiques. En complément du début de la saison des pluies (DSP), elle permet de circonscrire la période pluviale. L'ensemble des autres variables destinées à caractériser le comportement de cette saison sera calculé entre le DSP et la FSP. Selon la méthode de Balme *et al.* (2005), la détermination de la fin de la saison des pluies est définie par symétrie avec la date d'amorce correspondante. Pour adopter une définition véritablement agronomique, il est impératif d'intégrer le niveau de stock d'eau dans le sol, lequel est fortement influencé par le type de sol en question. Ainsi, la date marquant la fin de la saison des pluies est généralement établie comme étant le premier jour sec qui suit une séquence humide d'au moins N jours ayant enregistré un minimum de précipitation, sans qu'elle soit précédée par un épisode sec (inférieur à 5 mm) durant plus de dix jours consécutifs dans les jours antérieurs. En considérant les conditions climatiques spécifiques à la Côte d'Ivoire, une définition locale permet d'établir les dates effectives correspondant à l'achèvement de cette saison pluviale. Dans ce cadre, celle-ci se manifeste lorsque, à partir du 30 octobre, le sol capable d'accumuler 70 mm d'eau pluviale disponible aura complètement épuisé ce stock en raison d'une perte quotidienne estimée à 5 mm due à l'évapotranspiration. De surcroît, cette date doit être suivie d'un épisode sec s'étendant sur au moins 20 jours.

5.1.1.3. Longueur de la saison des pluies (LSP)

La longueur de la saison des pluies n'est autre que le nombre de jours comptabilisés entre le début de la saison des pluies (DSP) et la fin de la saison des pluies (FSP). Selon Kouakou *et al.* (2017), la longueur de la saison des pluies est calculée en faisant la différence entre la date de fin de la saison des pluies et la date de début de la saison des pluies suivant l'équation 1.

$$LSP = (FSP - DSP) + 1 \quad \text{Équation (1)}$$

Où,

LSP : Longueur de la saison des pluies (jour) ;

FSP : Fin de la saison des pluies (jour) ;

DSP : Début de la saison des pluies (jour).

5.1.1.4. Nombre de jours de pluie (NJP)

Le nombre de jours de pluie est défini comme étant le total des jours durant lesquels les précipitations ont dépassé 1 mm, et ce, entre le début et la fin de la saison des pluies (Bodian *et al.*, 2016). Ce paramètre constitue un indicateur redondant par rapport au cumul saisonnier, dans la mesure où il reflète également le comportement pluvieux tout au long de la saison. Cette variable est directement liée à la durée de la saison des pluies, si bien que la probabilité d'observer des jours pluvieux augmente avec l'allongement de cette dernière et diminue en cas de réduction.

5.1.1.5. Cumul de précipitation saisonnière (CPS)

Le cumul saisonnier correspond à la somme des précipitations mesurées lors des jours pluvieux (supérieurs à 1 mm) durant toute la période considérée. Cet indicateur intégrateur permet d'évaluer le comportement global de la saison des pluies, bien qu'il n'offre pas une analyse détaillée des phases internes, telles que l'alternance entre épisodes pluvieux et épisodes secs, ni celle des événements extrêmes (Dieng *et al.*, 2008). Le cumul saisonnier demeure sans conteste la variable pluviométrique couramment utilisée pour les prévisions saisonnières, même si, pour des raisons pratiques, son évaluation tend généralement à être réalisée sur une période fixe.

5.1.1.6. Hauteur journalière moyenne de précipitation (HMP)

Selon Moron *et al.* (2007), la hauteur journalière moyenne de précipitation est une variable qui correspond au rapport entre le cumul saisonnier et le nombre de jours entre la date de démarrage et la date de fin comme présenté par l'équation 2. Cette variable permet de situer les hauteurs moyennes qui tombent par jour de pluie pendant la saison pluviale :

$$HMP = \frac{CPS}{LSP} \quad \text{Équation (2)}$$

où,

HMP : Hauteur journalière moyenne de précipitation (mm) ;

CPS : Cumul de précipitation saisonnière (mm) ;

LSP : Longueur de la saison des pluies (jour).

5.1.1.7. Séquences sèches saisonnières (SS)

Une séquence sèche est une séquence de jours secs consécutifs dont les hauteurs de pluies sont inférieures à 1 mm, d'une durée en jour précédée et suivie par un jour pluvieux (Dékoula *et al.*, 2018). Ce descripteur est déterminé à partir des jours secs observés entre DSP et FSP.

5.1.2. Analyse des tendances dans les paramètres agroclimatiques et hydrométriques

5.1.2.1. Test de tendance de Mann-Kendall appliqué aux paramètres agroclimatiques et hydrométriques

Le test non-paramétrique de Mann (1945) et Kendall (1975) constitue une méthode statistique permettant d'identifier des changements et d'évaluer des tendances significatives au sein de séries chronologiques. En effet, cet outil est largement reconnu pour son efficacité dans l'analyse des tendances dans les données chronologiques et a été appliqué aux variables intra-saisonnières ainsi qu'aux débits journaliers, avec un seuil de signification fixé à 5 %. L'objectif est d'examiner la relation de dépendance entre les variables en fonction de l'hypothèse formulée (H_0). Les statistiques S , le tau ou coefficient des rangs de Kendall, ainsi que la p -value ou variable réduite ont été calculés. Soit (x_1, x_2, \dots, x_n) un échantillon de valeurs indépendantes associées à une variable aléatoire X dont la stationnarité est à évaluer. La statistique du test de Mann-Kendall est définie par l'équation 3 suivante.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{signe}(x_i - x_j) \quad \text{Équation (3)}$$

Où x_i et x_j représentent les valeurs séquentielles des données et n désigne la taille de l'échantillon. La statistique du test est obtenue en comptabilisant, pour tous les couples (x_i, x_j) avec $i < j$, le nombre de cas où la seconde valeur excède la première, ainsi que le nombre de cas où elle lui est inférieure, puis en calculant la différence entre ces deux quantités. L'existence d'une tendance statistiquement significative est déterminée à partir de la valeur Z issue de l'équation 4.

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad \text{Équation (4)}$$

En présence de valeurs identiques dans la série, la variance S peut être définie comme suit par l'équation 5 :

$$\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i i(i-1) / 18 \quad \text{Équation (5)}$$

où, t_i désigne le nombre d'égalités impliquant k valeurs.

Une valeur positive (ou négative) de Z indique une tendance ascendante (ou descendante) et sa significativité est comparée à la valeur critique ou seuil de significativité du test.

5.1.2.2. Test séquentiel de Mann-Kendall appliqué aux paramètres agroclimatiques et aux données hydrométriques

Le test séquentiel de Mann-Kendall est employé pour identifier le commencement d'une tendance au sein d'une série de données chronologiques. Ce test utilisé par Touré *et al.* (2022) prend en compte les valeurs de tous les éléments de la série temporelle (x_i) avec ($i = 1, 2, \dots, n$) (Some'E *et al.*, 2012). L'hypothèse nulle H_0 , stipule que l'échantillon examiné ne présente pas de point d'amorce de tendance dans les observations (x_i). Par conséquent, plusieurs étapes sont mises en œuvre afin de valider ou de rejeter l'hypothèse nulle H_0 , notamment le calcul de la variable (t) du test statistique selon l'équation 6 suivante.

$$t_j = \sum_1^j n_j \quad \text{Équation (6)}$$

où, n_j désigne pour chaque élément x_j ($j > k$), le nombre de fois où $x_j > x_k$, avec $j = 1, 2, \dots, n$ et $k = 1, 2, \dots, j - 1$.

La moyenne et la variance du test statistique sont données respectivement par l'équation 7 et l'équation 8 :

$$E(t) = \frac{n(n-1)}{4} \quad \text{Équation (7)}$$

$$Var(t_j) = \frac{j(j-1)(2j+5)}{72} \quad \text{Équation (8)}$$

La variable réduite symbolisée par $U(t)$ est déterminée pour l'ensemble des variables t_j du test statistique selon l'équation 9 :

$$U(t) = \frac{t_j - E(t)}{\sqrt{Var(t_j)}} \quad \text{Équation (9)}$$

où, $U(t)$ est une variable centrée et réduite.

5.1.2.3. Détermination des débuts de tendances des paramètres agroclimatiques et hydrométriques

De manière similaire au calcul de $U(t)$ qui s'effectue de manière progressive, la détermination de la valeur $U'(t)$ se réalise de façon régressive, c'est-à-dire en débutant par la fin de l'échantillon. Le commencement d'une tendance est établi lorsque l'une des deux variables centrées réduites $U(t)$ ou $U'(t)$ dépasse le seuil de signification (Tabari *et al.*, 2011). La représentation graphique des variables $U(t)$ et $U'(t)$ ainsi que leurs points d'intersection permettent d'identifier les débuts de tendance. Par conséquent, cette tendance est considérée comme à la baisse lorsque la variable $U(t)$ diminue, tandis qu'elle est qualifiée d'ascendante lorsque cette variable augmente au-delà du niveau de signification spécifié.

5.1.3. Analyse de la corrélation entre la pluviométrie, les paramètres agroclimatiques et la production

La production de la canne à sucre est intrinsèquement liée à des facteurs environnementaux optimaux. L'analyse de leurs impacts est réalisée par le biais de corrélations. Cette mise en lumière des interrelations s'est opérée à deux niveaux. Tout d'abord, une comparaison annuelle des précipitations a été effectuée afin d'établir la relation entre les pluies et la production de canne enregistrée. Ensuite, les variations des paramètres agroclimatiques ont été comparées à la production pour déterminer si ces fluctuations sont synchrones avec celles observées dans la production. Les relations entre les précipitations et la production, ainsi que celles entre les paramètres agroclimatiques et la production ont été évaluées à l'aide du coefficient de corrélation (R) de Bravais-Pearson (Dibi Kangah, 2010), qui permet d'apprécier l'intensité et le sens (positif ou négatif) de l'influence des pluies (y) sur les productions de canne à sucre (x). Ce coefficient se calcule selon l'équation 10 suivante :

$$R_{x,y} = \frac{cov(x,y)}{\sigma_x \times \sigma_y} \quad \text{Équation (10)}$$

avec, $cov(x, y)$, covariance de (x, y) et σ_x écart type de x et σ_y écart type de y.

5.1.3.1. Significativité de la corrélation

La significativité du coefficient de corrélation est vérifiée par le test de Student pour un risque d'erreur $\alpha = 0,05$ (Rakotomalala, 2012). La valeur calculée de Student t , obtenue selon l'équation 11 est comparée à celle figurant dans la table de Student.

$$t = |R| * \sqrt{\frac{n-2}{1-R^2}} \quad \text{Équation (11)}$$

n = Taille de l'échantillon.

Si $\alpha \geq 0,05$ la tendance est non significative ;

Si $\alpha < 0,05$ (*) la tendance est significative ;

Si $\alpha < 0,01$ (**) la tendance est très significative ;

Si $\alpha < 0,001$ (***) la tendance est très très significative.

5.1.3.2. Analyse de la corrélation entre les paramètres agroclimatiques et la production agricole

Une matrice de corrélation a été employée pour évaluer les impacts des paramètres agroclimatiques sur les paramètres agricoles liés à la culture de la canne à sucre. Cette matrice, constituée des coefficients de corrélation calculés entre plusieurs variables prises par paires

(Rakotomalala, 2012), est symétrique et présente une diagonale remplie de 1, reflétant ainsi la parfaite corrélation d'une variable avec elle-même. L'analyse a principalement porté sur la comparaison des productions agricoles observées avec les variables pluviométriques intra-saisonnières. En effet, un coefficient de corrélation compris entre -1 et 1 indique que lorsque ce coefficient est positif, il existe un lien direct (une augmentation d'une variable entraîne une augmentation de l'autre). À l'inverse, une valeur négative indique un lien inverse (l'augmentation d'une variable entraîne une diminution de l'autre). De plus, les valeurs en valeur absolue illustrent la force du lien.

5.1.4. Détermination du calendrier culturel de la canne à sucre

La méthode proposée par Franquin (1973) permet d'identifier les saisons culturelles pour diverses cultures. Cette approche a été mise en œuvre par Diomandé *et al.* (2016) afin d'établir le calendrier culturel du riz dans la sous-préfecture de Béoumi. Elle repose sur le croisement de la courbe des précipitations (P) avec celle de l'Évapotranspiration Potentielle (ETP) de même que la moitié de celle-ci (ETP/2), comme représenté à la figure 18. Ce croisement facilite l'identification des événements climatiques significatifs qui délimitent les périodes pré-humide, humide et post-humide au sein des saisons culturelles (pluvieuse et sèche). Ainsi, le cycle se répartit comme suit :

- période pré-humide : A_2B_1 avec $P < ETP$, donc $ETR < ETP$;
- période humide : B_1B_2 avec $P > ETP$, donc $ETR = ETP$;
- période post-humide : B_2C_2 avec $P < ETP$, donc $ETR < ETP$.

Ces saisons déterminent le calendrier culturel. La saison pluvieuse indique les apports de pluies tandis que la saison humide (au moment où le flétrissement commence à décroître) rend compte du bilan des apports et des pertes.

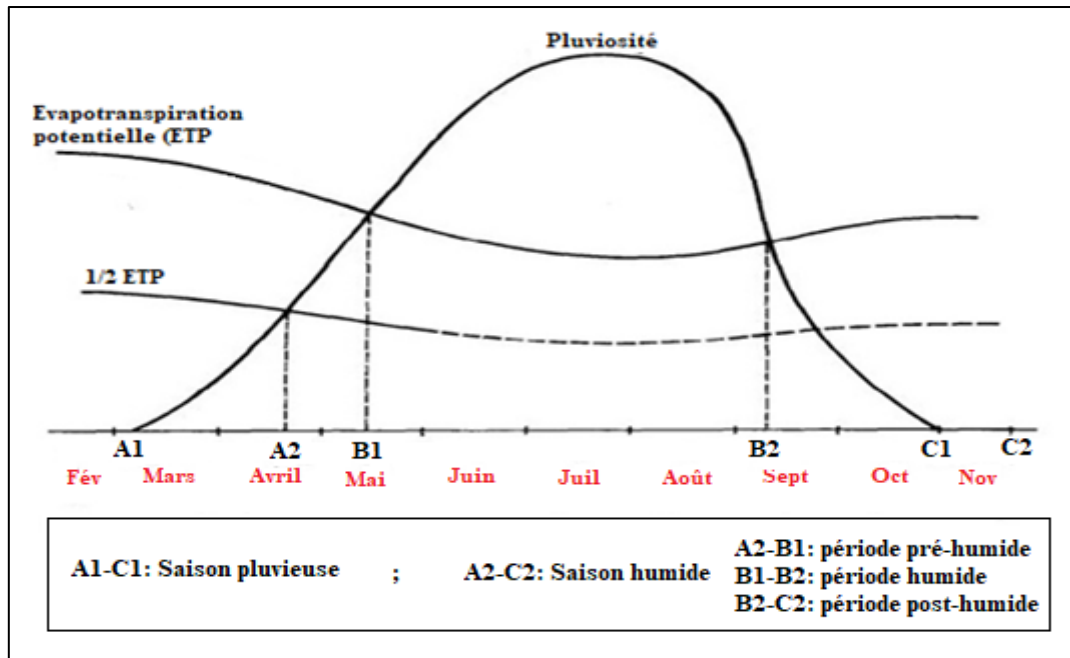


Figure 18 : Graphe de détermination des saisons culturales selon Franquin (1973)

5.1.5. Étude des tendances pluviométriques dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

5.1.5.1. Analyse spatio-temporelle de la pluviométrie dans le bassin versant

L'étude de la variation spatio-temporelle de la pluviométrie dans le bassin versant s'est faite avec les données annuelles de la période 1970-2020. Pour une meilleure analyse de la variation spatio-temporelle de la pluviométrie, un pas de temps décennal a été utilisé. Il s'agit des décennies 1970-1979 ; 1980-1989 ; 1990-1999 ; 2000-2009 et 2010-2020. Les moyennes pluviométriques annuelles ont été calculées sur les cinq décennies portant sur les 4 postes météorologiques de l'étude. La base de données ainsi obtenue a été spatialisée en utilisant la technique d'interpolation de type krigeage (Krige, 1951). Ainsi, le suivi de l'isohyète 1400 mm permet d'illustrer le déplacement des zones de forte ou faible pluviosité. Cette isohyète sert de référence parce qu'elle représente la moyenne pluviométrique sur la période 1970-2020 pour l'ensemble des stations.

5.1.5.2. Analyse des indices standardisés de Précipitation et d'Evapotranspiration (SPEI)

L'indice standardisés de précipitation et d'évapotranspiration, en anglais Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), permet la détermination de la sécheresse météorologique. Il possède les mêmes caractéristiques que le SPI. Le choix de cet indice, élaboré par Vicente-Serrano *et al.* (2010) repose sur ses multiples avantages en termes de cohérence statistique ainsi

que sur sa capacité à décrire les impacts de la sécheresse à diverses échelles temporelles. Cet indice ne se limite pas aux seules données de précipitations, mais intègre également celles relatives à l'évapotranspiration. Les valeurs du SPEI sont dérivées de l'équation 12 suivante :

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3} \quad \text{Équation (12)}$$

où $W = \sqrt{-2Ln(P)}$ et C et d sont des constantes avec :

$C_0 = 2,515517$; $C_1 = 0,802853$; $C_2 = 0,010328$; $d_1 = 1,432788$; $d_2 = 0,189269$; $d_3 = 0,001308$.

5.1.5.3. Durée des séquences de sécheresse

La durée constitue l'une des caractéristiques essentielles de la sécheresse. En effet, bien qu'une sécheresse puisse se manifester rapidement sous certains régimes climatiques, il est généralement nécessaire d'attendre une période d'au moins deux à trois mois avant qu'elle ne s'établisse dans d'autres régions. Par la suite, elle peut persister pendant plusieurs mois, voire des années. Le calcul de la durée de la sécheresse s'effectue, par analyse de la série de données sur la longue période afin de déterminer la période la plus sèche comme indiqué par N'Guessan (2025). Ensuite, on soustrait l'année de fin (où se termine la période sèche) de l'année de début. La valeur obtenue est ajoutée d'un.

Ainsi, la durée s'obtient selon l'équation 13 suivante :

$$d = (A_{fin} - A_{début}) + 1 \quad \text{Équation (13)}$$

où

d : Durée de la séquence sèche (jr)

A_{fin} : Année de la fin de la période sèche ;

$A_{début}$: Année du début de la période sèche.

5.1.5.4. Intensité des séquences de sécheresse

L'intensité de la sécheresse peut être définie comme étant l'ampleur et la gravité des effets engendrés par un déficit de précipitations (Koffi, 2022). Cette intensité est mesurée à travers les valeurs de SPEI. Une situation de sécheresse se manifeste lorsque le SPEI demeure négatif sur une période prolongée, atteignant une valeur d'au moins -1, et prend fin dès que le SPEI redevient positif. La classification des niveaux de sécheresse s'effectue selon les valeurs présentées dans le tableau VII. La valeur extrême mensuelle du SPEI a été considérée comme référence pour évaluer l'intensité de la sécheresse.

Tableau VII : Classification des intensités de sécheresse selon les indices (Vicente-Serrano *et al.*, 2010)

| Valeur SPEI | Intensités de la sécheresse |
|------------------------------|-----------------------------|
| $SPEI \geq 2$ | Extrêmement humide |
| $1,99 \geq SPEI \geq 1,50$ | Sévèrement humide |
| $1,49 \geq SPEI \geq 1,00$ | Modérément humide |
| $0,99 \geq SPEI \geq 0$ | Légèrement humide |
| $0 \geq SPEI \geq -0,99$ | Sécheresse légère |
| $-1,00 \geq SPEI \geq -1,49$ | Sécheresse modérée |
| $-1,50 \geq SPEI \geq -1,99$ | Sécheresse sévère |
| $SPEI \leq -2$ | Sécheresse extrême |

5.1.6. Évaluation des paramètres du changement climatique dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

5.1.6.1. Évaluation de la fiabilité des sorties des modèles climatiques

Un modèle climatique est considéré comme fiable pour simuler des scénarios climatiques futurs s'il est capable de reproduire avec précision le climat actuel (Koffi, 2022). Dans cette optique, une analyse comparative a été réalisée entre les données climatiques observées (précipitations et températures) et celles simulées durant la période de référence (1970-2005). Plusieurs critères tels que les anomalies annuelles, les erreurs relatives, la variance et le coefficient de détermination ont été utilisés pour évaluer la qualité des modèles. Ces critères fournissent une estimation globale et quantitative de l'écart entre les résultats observés et simulés. L'erreur relative a été choisie comme indicateur numérique pour mesurer la performance des modèles RACMO22T, RCA4 et REMO2009. Cette erreur relative (E_r) permet d'identifier si le modèle climatique reproduit mieux les paramètres étudiés. Elle se formule selon l'équation 14 comme suit :

$$E_r = \left(\frac{X_{cal} - X_{obs}}{X_{obs}} \right) * 100 \quad \text{Équation (14)}$$

où :

X_{cal} : Valeur du paramètre calculé ;

X_{obs} : Valeur du paramètre observé.

$E_r < 0$, le modèle sous-estime le paramètre calculé ;

$E_r > 0$, le modèle surestime le paramètre calculé.

5.1.6.2. Correction des sorties des modèles climatiques

Les données issues des modèles climatiques présentent des biais. Diverses méthodes de correction de biais existent afin d'ajuster les sorties des modèles climatiques retenus. Dans ce

travail, la méthode du Delta a été appliquée pour corriger les sorties futures produites par les modèles RACMO22T, RCA4 et REMO2009 à l'horizon 2021-2060, sous deux scénarios d'émissions RCP4.5 et RCP8.5. La méthode du Delta identifie un changement (ou une anomalie) correspondant(e) à la différence des moyennes entre une simulation climatique future et celle d'un climat présent (Lenderink *et al.*, 2007). Cette méthode a été utilisée au cours de cette étude parce qu'elle donne de meilleurs résultats de correction de biais des données de simulation CORDEX Afrique.

5.1.6.3. Détermination des taux de variation des paramètres climatiques

Les données journalières simulées aux horizons 2040 et 2060 sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 sont confrontées aux valeurs observées durant la période de référence 1970-2005 (Koffi, 2022). Les taux de variation pour les périodes futures 2021-2040 (horizon 2040) et 2041-2060 (horizon 2060), sont déterminés conformément à l'équation 15 suivante :

$$\nabla_{\text{Horizon},i} = \left(\frac{\bar{X}_{\text{Horizon},i} - \bar{X}_{\text{Ref},i}}{\bar{X}_{\text{Ref},i}} \right) * 100 \quad \text{Équation (15)}$$

Avec :

$\nabla_{\text{Horizon},i}$: Taux de variations d'un horizon donné ;

$\bar{y}_{\text{Horizon},i}$: Valeur moyenne mensuelle ou annuelle d'un horizon donné ;

$\bar{y}_{\text{Ref},i}$: Valeur moyenne mensuelle ou annuelle calculée sur la période de référence.

5.2. Évaluation de la disponibilité de l'eau dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

5.2.1. Caractérisation des écoulements dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

5.2.1.1. Détermination des lames d'eau écoulées (Le)

La connaissance de la tranche d'eau moyenne précipitée permet une comparaison avec la lame d'eau écoulée. Il est ainsi possible de déduire le déficit d'écoulement (Mettin, 1994). Les lames d'eau écoulées sont déterminées avec les débits des cours d'eau. Selon les objectifs de l'étude, elles peuvent être journalières, mensuelles ou annuelles. Ce sont les débits annuels qui sont calculés à partir de l'équation 16 ci-dessous :

$$Le = 365 \times 86,4 \times \frac{Q}{5} \quad \text{Équation (16)}$$

Le : Lame annuelle écoulée (mm) ;

Q : Débit (m³/s) ;

S : Superficie du bassin versant (km²) ;

365 x 86,4 : Coefficient relatif à la conversion au temps en secondes dans l'année.

5.2.1.2. Coefficient d'écoulement (Ce)

Il existe une relation intrinsèque entre l'indice d'écoulement et la hauteur moyenne des précipitations qui se sont déversées dans un bassin versant. Il convient de souligner que le coefficient d'écoulement dépend des hauteurs de précipitations, mais également de la répartition des pluies dans le bassin versant comme abordé par Mabonzo (2021). Le coefficient d'écoulement est déterminé par l'équation 17 suivante :

$$Ce = \frac{L_e}{P_{moy}} \quad \text{Équation (17)}$$

avec,

L_e : Lamme d'eau écoulee (mm),

P_{moy} : Précipitation moyenne (mm)

5.2.1.3. Étude de la variation des écoulements

L'irrégularité interannuelle des écoulements dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona est étroitement corrélée aux fluctuations des précipitations. Cette corrélation peut être évaluée par l'analyse des variations du rapport entre les débits extrêmes (coefficient d'immodération), du coefficient d'hydraulicité (Ch) et du coefficient de variation (Goula *et al.*, 2006).

5.2.1.4. Indice de sécheresse hydrologique dans le bassin versant (SDI)

L'indice de sécheresse des débits (SDI) est analogue à l'indice de Bhalme et Mooley. Le SDI encore appelé l'écart moyen du débit (EMD) est utilisé pour déterminer la réaction d'un cours d'eau face au déficit pluviométrique et permet de déterminer les variations du débit (Nalbantis & Tsakiris, 2009). Généralement, pour les petits bassins, l'écoulement possède une probabilité de distribution asymétrique qui peut être approximée par la famille des fonctions Gamma. La distribution est par la suite transformée en une loi normale. La loi Log-normale à deux paramètres, très simple, a été utilisée, Il suffit d'utiliser le logarithme népérien (ln) des débits écoulés. Ainsi, le SDI tenant compte de la non-stationnarité se définit comme suit par l'équation 18 suivante :

$$SDI_{i,k} = \frac{y_{i,k} - \bar{y}_k}{S_{y,k}} \quad \text{Équation (18)}$$

$i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, 3, 4$ Avec, $y_{i,k} = \ln(v_{i,k})$

Les logarithmes naturels des débits cumulés sont avec : k_y : moyenne et $S_{y,k}$: écart-type estimés sur une longue chronique.

Tableau VIII : Classification de la sécheresse hydrologique (Nalbantis & Tsakiris, 2009)

| Etat | Description | Critère |
|------|---------------------|------------------------|
| 0 | Pas de sécheresse | $SDI \geq 0,0$ |
| 1 | Sécheresse atténuée | $-1,0 \leq SDI < 0$ |
| 2 | Sécheresse modérée | $-1,5 \leq SDI < -1,0$ |
| 3 | Sécheresse sévère | $-2,0 \leq SDI < -1,5$ |
| 4 | Sécheresse extrême | $SDI < -2,0$ |

5.2.2. Étude de l'évolution des écoulements dans le bassin versant du fleuve

Sassandra à Sorotona

5.2.2.1. Coefficient d'hydraulicité

L'hydraulicité se réfère à l'écoulement moyen annuel d'un cours d'eau. Elle est établie sur une longue période afin de caractériser l'abondance de l'écoulement durant ladite année (Mabonzo, 2021). Elle est déduite grâce à l'équation 19.

$$Ch = \left(\frac{Q_{ma} - Q_{mi}}{Q_{mi}} \right) \times 100 \quad \text{Équation (19)}$$

avec :

Ch : Coefficient d'hydraulicité ;

Q_{mi} : Débit moyen annuel (m^3/s) ;

Q_{ma} : Débit moyen interannuel (m^3/s).

5.2.2.2. Détermination du régime hydrologique dans le bassin versant

La méthode traditionnelle d'étude des régimes des cours d'eau repose sur l'analyse des débits moyens mensuels, en rapport avec le module annuel, appelé coefficient moyen de débit (CMD) (Camara *et al.*, 2021). Cette approche présente l'avantage d'une comparaison facilitée des variations saisonnières entre les cours d'eau présentant des débits très différents. Le coefficient mensuel de débit est calculé en divisant le débit moyen mensuel par le débit moyen annuel, selon l'équation 20.

$$CMD = \frac{Q_{men}}{Q_{moy}} \quad \text{Équation (20)}$$

avec : Q_{men} : Débit mensuel (m^3/s),

Q_{moy} : Débit moyen annuel (m^3/s)

Les mois où le coefficient mensuel de débits est inférieur à un, représentent la période de basses eaux, et les mois où le CMD est supérieur à un, correspondre à la période de hautes eaux.

5.2.2.3. Débits d'étiage

Selon Lang (2011), l'analyse des débits d'étiage est souvent réalisée à partir d'une série de débits annuels. Cependant, il convient de souligner que parmi ces débits, tous ne reflètent pas nécessairement une situation hydrologique extrême, en particulier dans les années très pluvieuses. Les débits minimums annuels peuvent être sélectionnés selon différentes échelles temporelles, souvent le pas de temps mensuel ou journalier. Il est possible de distinguer les débits d'étiage provenant de l'échelle mensuelle et ceux calculés à partir de moyennes mobiles journalières.

5.2.2.4. Débits d'étiage absolu

L'étiage absolu (ou minimum absolu) est déterminé par l'ensemble des débits moyens journaliers disponibles sur une période d'analyse (Lang, 2011). Il représente le niveau le plus bas de débit enregistré dans un cours d'eau au cours d'une année.

5.2.2.5. Débits caractéristiques d'étiage (DCE)

Le débit caractéristique d'étiage (DCE) fait référence au débit qui est atteint ou non dépassé pendant 10 jours au cours d'une année (Lang, 2011). C'est un paramètre fréquemment employé pour décrire les périodes d'étiage sur un cours d'eau. Les DC_x sont aussi utilisés dans les études statistiques des volumes et des durées de déficit, qui reposent sur des débits seuils pour les périodes d'étiage. On distingue ainsi les débits caractéristiques de durées 11, 9 et 6 mois, désignés respectivement par DC_{11} , DC_9 et DC_6 , représentant les débits dépassés pendant 335, 274 et 182 jours dans l'année.

5.2.2.6. Débit moyen mensuel (QMNA)

Le QMNA est dérivé de la quantité mensuelle minimale annuelle de fréquence sèche. C'est la variable communément utilisée pour caractériser les périodes de basses eaux d'un cours d'eau. Le QMNA représente une valeur réglementaire qui a l'inconvénient d'être liée à une échelle temporelle calendaire. Les débits en période de basses eaux peuvent être observés sur une période chevauchant deux mois, entraînant une surestimation du débit de basses eaux par le QMNA (Lang, 2011).

5.2.2.7. Débits moyens minimums journaliers (VCN_d)

Les valeurs critiques de débit minimum (VCN_d) sont annuellement extraites en fonction d'une durée fixe *d*. Selon Lang (2011), les moyennes mobiles obtenues à partir des débits moyens journaliers sur plusieurs jours successifs, sont utilisées pour le calcul des VCN_d. Ils représentent le débit moyen minimum sur une période *d* jours. Les VCN de durées 7 ou 10 jours sont des valeurs réglementaires couramment utilisées dans de nombreuses études et sont largement employées dans les travaux traitant des étiages.

5.2.3. Simulation des écoulements dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona avec le modèle hydrologique CEQUEAU

L'évaluation des écoulements pour la pérennisation de l'irrigation dans l'exploitation agricole de Borotou-Koro tient compte de la recherche des liens qui existent entre les facteurs tels que la pluviométrie, les débits, le coefficient d'écoulement et l'occupation du sol dans le bassin versant. La mise en évidence des différents liens est effectuée par l'application du modèle hydrologique CEQUEAU dans le bassin versant. Ainsi, avant la simulation des écoulements, la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona a été étudiée. En effet, la réponse hydrologique du bassin versant est la résultante de tous les éléments physiques présents dans ce bassin. L'occupation du sol, est le facteur le plus dynamique dans un bassin versant dont la variation a une influence significative sur les écoulements. Dans le cadre de cette étude, les cartes d'occupation du sol passée et présente ont servi à évaluer les lames d'eau écoulées du fleuve Sassandra à Sorotona. Pour l'évaluation future, les cartes d'occupation du sol futures (2034 et 2054) produites par le modèle Land Changer Modeler ont servi de support pour la simulation des écoulements futurs dans le bassin versant.

5.2.3.1. Étude de la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant

Les changements d'occupation du sol, génèrent des impacts sur la disponibilité des ressources en eau de surface. L'intensification des activités anthropiques dans le bassin versant durant les 30 dernières années a provoqué des changements d'usage des sols et des mutations au niveau des structures paysagères qui ont engendré une importante modification de la quantité et la qualité des ressources en eau dans le bassin versant. Pour mieux appréhender la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant, son étude s'est faite selon l'organigramme de la figure 19.

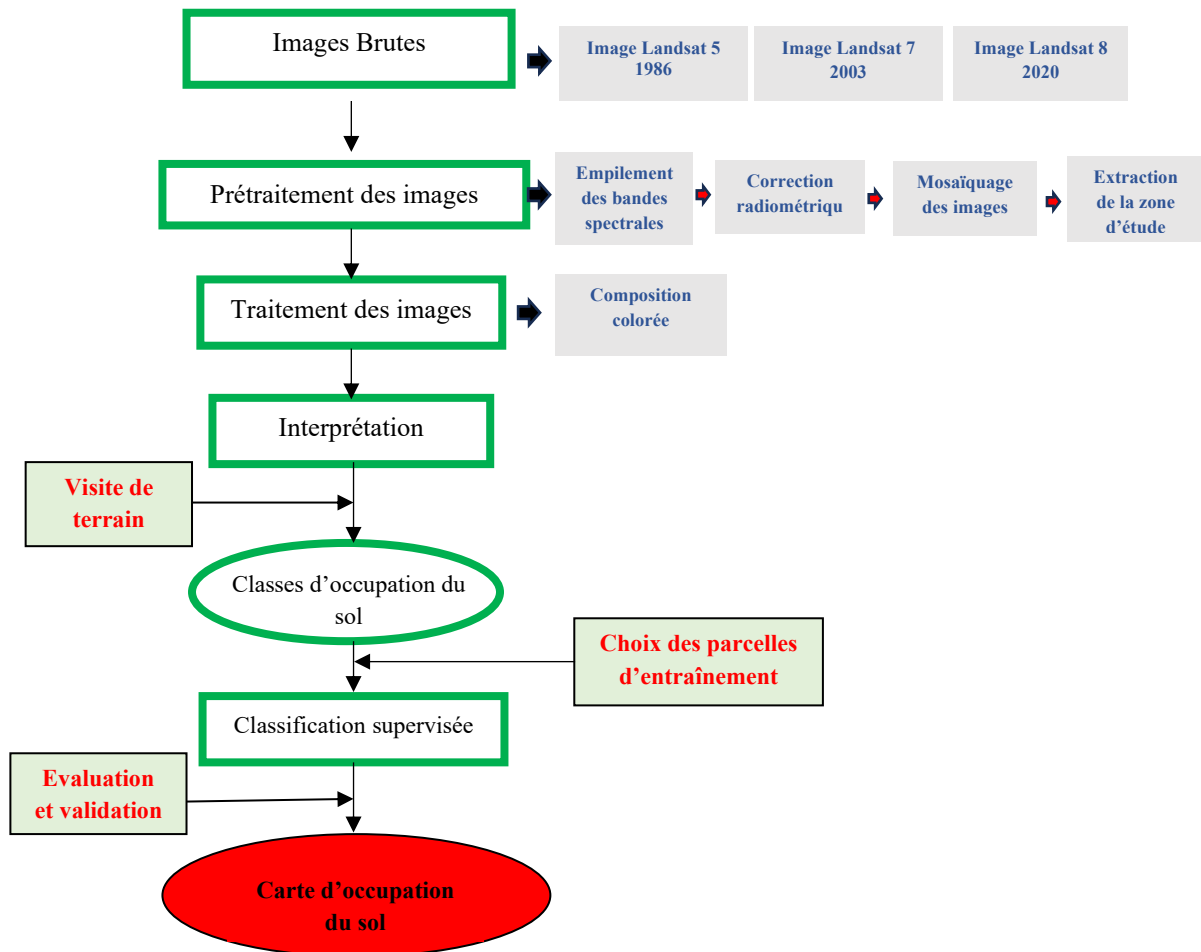


Figure 19: Organigramme méthodologique d'établissement des cartes d'occupation du sol

5.2.3.1.1. Prétraitement des images

Le prétraitement des images satellitaires englobe l'ensemble des opérations nécessaires avant l'analyse principale. Ces opérations s'effectuent dans le but de rendre les images lisibles et bien superposables. Dans le cadre de cette étude, le prétraitement a consisté à faire l'empilement des bandes, la correction radiométrique, le mosaïquage des images, l'extraction de la zone d'étude et l'amélioration du contraste des images.

5.2.3.1.2. Traitement des images

❖ Composition colorée

La composition colorée est primordiale dans le traitement des images satellitaires car elle permet de voir et d'identifier les grands ensembles et de faire la classification. En effet, la composition colorée consiste à afficher simultanément à l'écran, trois bandes d'images dans les canaux de base (Rouge/Vert/Bleu) et faciliter l'extraction des informations (Kouadio, 2011). Une composition colorée peut se faire entre les bandes 1, 2 et 3. Cette composition colorée ainsi obtenue est proche des couleurs naturelles de la surface de la terre. La composition colorée la

plus utilisée dans les études de classification est 4-3-2, c'est-à-dire, la bande 4 dans le canal Rouge, la bande 3 dans le canal Vert et la bande 2 dans le canal Bleu (Girard, 1999). Cette composition colorée permet de bien séparer l'eau des autres entités. Elle permet également de différencier la végétation des sols nus. L'eau apparaît bleu sombre à clair en fonction de la clarté. Les végétaux chlorophylliens apparaissent en magenta et les peu chlorophylliens en brun-vert. Les sols nus apparaissent en bleu ou cyan plus ou moins clair et les habitats en bleu très clair à blanc. Par moment la composition colorée avec des fausses couleurs est utilisé quand les bandes sont affichées en désordre dans les différents canaux. La composition colorée en fausses couleurs permet de ressortir sur une image certains objets d'intérêt particulier. Par exemple, une autre combinaison 2-5-4, utilisant la bande 2 dans le canal bleu, la bande 5 dans le canal vert et la bande 4 dans le canal rouge permet de différencier nettement la végétation et le sol.

5.2.3.1.3. Interprétation visuelle et identification des classes d'occupation du sol

La technique d'interprétation visuelle est basée sur la connaissance des détails de quelques objets géographiques. Sur la base de l'analyse des images satellitaires, deux grands groupes d'éléments paysagers ont été identifiés : des éléments linéaires et des tâches. Le premier groupe intègre les galeries forestières, les routes, les chaînes de montagne. Le deuxième groupe englobe les espaces destinés aux activités anthropiques que sont les cultures, les habitations et les sols nus (Agbanou, 2018).

5.2.3.1.4. Classification des images satellitaires

Les deux méthodes de classification que sont la classification non supervisée et la classification supervisée sont utilisées dans le cadre de l'élaboration des cartes d'occupation du sol. Dans cette étude, la classification supervisée a été utilisée. En effet, la classification supervisée fait appel à une connaissance à priori du terrain telle que la réflectance des types d'occupation du sol, la position géographique, la topographie du milieu et surtout leur accessibilité (bordure de route et de localités) (Kouadio, 2011). La sélection et la définition des classes d'intérêt sont nécessaires pour transformer avec succès les images satellitaires en information d'occupation du sol. Le choix de ces classes est fondé sur la mise en correspondance des informations sur les images et celles recueillies sur le terrain. Dans cette étude, la méthode de classification supervisée par l'algorithme de maximum de vraisemblance a été utilisée. Le tableau IX présente les différentes classes d'occupation du sol retenues pour cette étude.

Tableau IX : Classes d'occupation du sol et leurs caractéristiques (Kouadio, 2011)

| Désignation | Descriptions |
|----------------------|--|
| Forêt | La végétation est employée, en général, pour désigner la présence d'une activité chlorophyllienne. Le comportement spectral de la végétation est différent de celui des sols et des roches. La végétation, est un milieu complexe, qui change en fonction, des saisons distinctes à savoir la saison sèche et la saison des pluies. La saison pluvieuse est marquée par une forte présence de la chlorophylle. La végétation se caractérise par deux bandes d'absorption dans le bleu et le rouge et par un premier maximum de réflectance dans le vert suivi d'un second, nettement plus marqué, dans le proche infrarouge. |
| Savane | Les paysages de cultures se spécifient sur les images satellitaires et les photographies aériennes par leurs formes (figures géographiques) d'exploitation. La signature spectrale des cultures est correctement déterminée par une approche multi temporelle. La télédétection sert à estimer l'extension des cultures si la résolution spatiale le permet, et à estimer le rendement d'une culture (Robin, 1999). |
| Cultures | Les sols nus ou les surfaces minérales naturelles ou artificielles possèdent un comportement spectral croissant en allant du visible à l'infrarouge proche et moyen réflectif, essentiellement fonction de la nature des surfaces minérales, leur teneur en eau, leur composition physicochimique et de leur rugosité (Girard, 1999). |
| Habitats | L'eau pure réfléchit très peu dans le domaine du visible (le rouge) et de l'infrarouge et apparaît de couleur sombre sur les images satellitaires. Cette réponse spectrale est due à l'absorption de la lumière par les surfaces en eau. Le comportement spectral de l'eau est modifiable selon les constituants dissous ou en suspension comme les particules, les algues, les matières organiques (Girard, 1999). |
| Sols nus | |
| Eau | |
| Zones humides | |

4.2.3.1.5. Validation de la classification

La validation des cartes d'occupation du sol a été effectuée en utilisant la matrice de confusion et l'indice de Kappa.

❖ Matrice de confusion

La matrice de confusion constitue un outil essentiel pour évaluer la qualité des résultats obtenus par le processus de classification. Elle permet d'extraire le pourcentage d'une classe d'occupation du sol correctement classée au sein de sa catégorie, ainsi que d'analyser les erreurs d'omission et les erreurs de commission (Boussougou, 2017). Les erreurs d'omission (présentées en colonne) sont déterminées en calculant le rapport entre le nombre de pixels correctement classés dans chaque catégorie et le total des pixels appartenant à cette même catégorie. De manière analogue, les erreurs de commission (présentées en ligne) sont également

calculées selon une méthode similaire, mais appliquée aux lignes. En outre, la matrice de confusion facilite également le calcul de l'indice d'exactitude I des cartes d'occupation du sol, conformément à l'équation 21.

$$I = \sum \frac{xd}{N} \quad \text{Équation (21)}$$

Avec

xd = observations de la diagonale ;

N le nombre total des observations.

Si $I \geq 0,9$ alors l'interprétation est correcte.

❖ Évaluation de la qualité de la classification

Bien que l'indice de Kappa de Cohen fasse actuellement l'objet de contestation (Pontius & Millones, 2011), aucun autre indice n'a encore démontré une capacité équivalente à évaluer et valider les résultats issus de la classification supervisée des unités d'occupation du sol. Cet indice est donc couramment employé pour mesurer les similarités entre les résultats observés et ceux attendus. Son calcul repose sur un tableau de contingence (ou tableau de confusion) qui illustre la répartition des classes présentes dans la carte de référence par rapport à celle des résultats obtenus. Ce tableau se présente sous la forme d'une matrice à double entrée, où les lignes représentent les classes des cartes produites et les colonnes correspondent aux données issues du contrôle au sol. Sur la diagonale de ce tableau figurent les unités de végétation correctement identifiées, tandis que des erreurs d'omission et de confusion se trouvent en dehors de cette diagonale. Lorsque l'indice de Kappa dépasse 75 %, cela indique que la classification appliquée est valide et que les résultats peuvent être utilisés avec discernement pour l'élaboration des cartes d'occupation du sol (Pontius, 2000).

5.2.3.2. Analyse de la dynamique des changements de classe d'occupation du sol de 1986, 2003 et 2020

L'analyse de la dynamique de l'occupation du sol permet de comparer les cartes réalisées en 1986, 2003 et 2020 afin de faire ressortir la dynamique de chaque classe d'occupation du sol. Les cartes réalisées sont comparées deux à deux (1986-2003 ; 2003-2020 et 1986-2020). Un tableau de synthèse récapitule l'évolution ou la régression des différentes catégories d'occupation du sol.

5.2.3.2.1. Calcul du taux d'évolution (E)

Le taux d'évolution permet d'apprécier l'évolution des différentes classes d'occupation du sol entre deux périodes (Kouadio, 2011). Ce taux est calculé pour toutes les classes d'occupation du sol, à partir de l'équation 22.

$$E = \frac{S_2 - S_1}{S_1} \times 100 \quad \text{Équation (22)}$$

Avec, S_1 la superficie d'une classe d'occupation du sol à l'année 1 et S_2 la superficie d'une classe d'occupation du sol à l'année 2.

Si $E = 0$, on conclut qu'il y a stabilité de cette catégorie d'occupation du sol ;

Si $E < 0$, on conclut qu'il y a régression de cette catégorie ;

Si $E > 0$, il y a extension ou évolution de cette catégorie.

5.2.3.2.2. Calcul du taux moyen annuel d'expansion spatiale (T)

Le taux moyen annuel d'expansion spatiale exprime les superficies de chaque classe d'occupation du sol qui subit une mutation d'une période P_1 à une période P_2 , à partir de la superficie de ces catégories. Ce taux est calculé suivant l'équation 23 de la formule de Bernier citée par Agbanou (2018).

$$T = \left[\frac{(\ln S_2 - \ln S_1)}{((P_2 - P_1) \times \ln e)} \right] \times 100 \quad \text{Équation (23)}$$

S_1 et S_2 : Superficie d'une unité paysagère à la date t_1 et t_2 respectivement ;

$P_2 - P_1$: Nombre d'année d'évolution ;

\ln : Logarithme népérien ;

e : Base du logarithme népérien ($e = 2,71828$).

5.2.3.2.3. Calcul de la vitesse d'évolution des catégories d'occupation du sol

La vitesse de variation des classes d'occupation du sol est appréciée par l'application de l'équation 24 proposée par Agbanou (2018).

$$\Delta_s = \frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1} \quad \text{Équation (24)}$$

où :

Δ_s = Vitesse de variation (extension ou régression en ha/an) ;

S_1 = Superficie occupée par la classe considérée au cours de l'année 1 (ha) ;

S_2 = Superficie occupée par la classe considérée au cours de l'année 2 (ha) ; t_1 = année 1 ; t_2 = année 2.

5.2.4. Application du modèle LCM pour la prédiction de l'évolution de l'occupation du sol dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

La figure 20 présente les étapes majeures du modèle LCM-IDRISI (Eastman, 2012) utilisées dans cette étude. Trois étapes majeures caractérisent l'application du modèle : les données d'entrée, les traitements (modules), la validation et les résultats de prédiction.

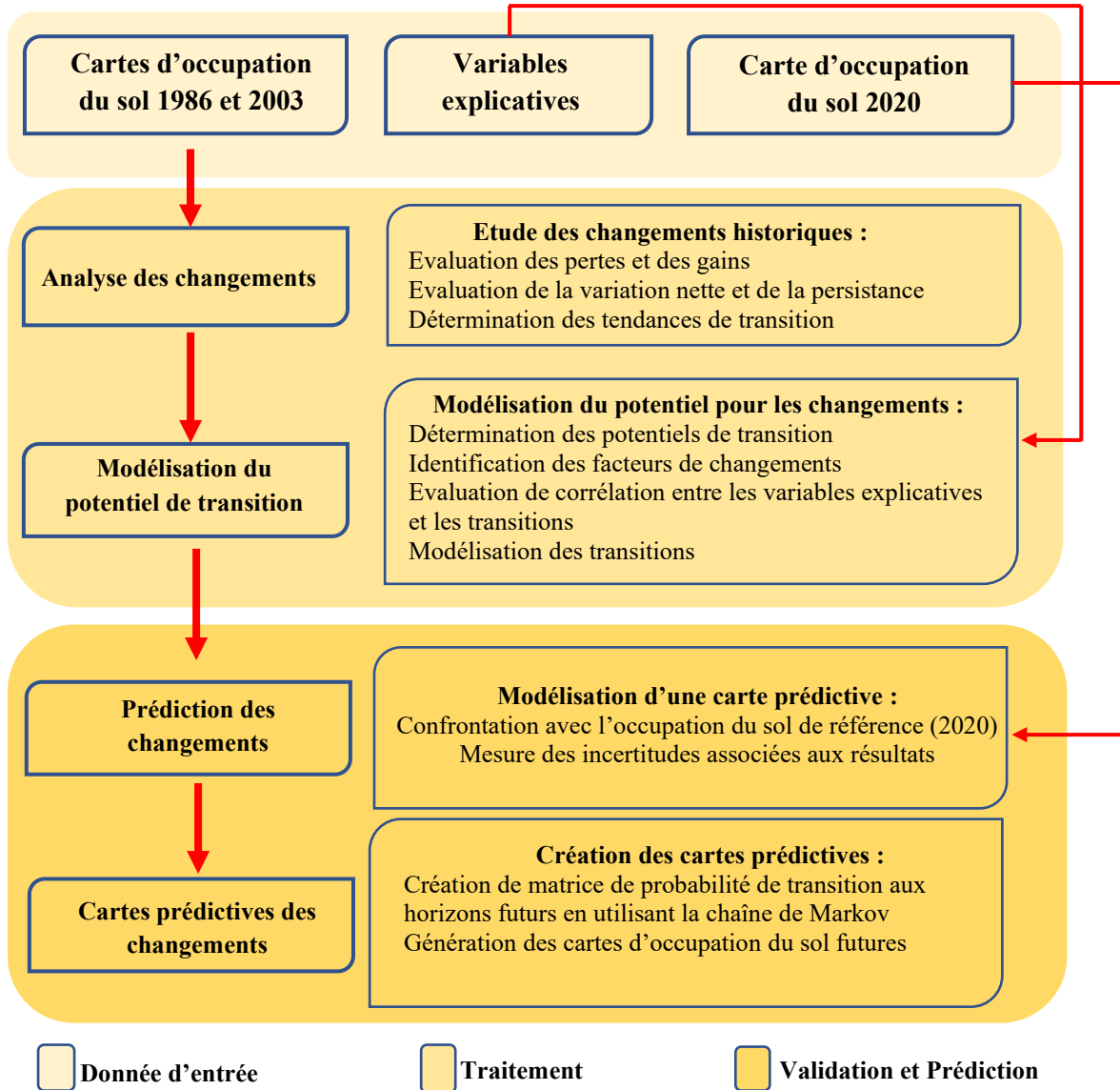


Figure 20: Organigramme de prédiction de l'occupation du sol à l'aide du Modèle LCM.

5.2.4.1. Données d'entrée du modèle LCM

Les données d'entrée du modèle Land Changer Modeler pour la simulation des cartes d'occupation futures sont les cartes d'occupation du sol et les variables explicatives.

5.2.4.1.1. Cartes d'occupation du sol

Les données utilisées dans le cadre de la simulation des cartes d'occupation futures sont variées. Elles comprennent des cartes de l'occupation du sol des années 1986 et 2003 qui ont été utilisées

comme données initiales pour créer les cartes prédictives. La carte de 2020 est utilisée comme carte de référence pour valider les cartes prédictives. Les cartes des altitudes, des pentes, du réseau routier, du réseau hydrographique et des localités considérées comme des variables explicatives sont introduites en données d'entrée du sous-modèle de transition (transition sub-model) (Koffi, 2022).

5.2.4.1.2. Facteurs explicatifs des changements observés

La simulation de plusieurs catégories de changement de couverture terrestre dépend de plusieurs variables explicatives (Li & Yeh, 2002). Les variables explicatives qui ont été les facteurs de changement de couverture terrestre antérieure devraient être une force influente dans les changements futurs et sont sélectionnées en fonction de leurs disponibilités et de leurs capacités explicatives. Le modèle numérique de terrain, la pente et la distance de la route représentent l'accessibilité d'une localité. La distance de la zone construite et le centre urbain mettent en évidence l'emplacement immédiat de l'urbanisation. La signification des variables explicatives est testée à l'aide du coefficient V de Cramer qui mesure la force d'association entre deux variables catégorielles basées sur les statistiques du Chi-carré (Pérez-Vega *et al.*, 2012). Dans cette étude, le changement de couverture terrestre dans la période de temps historique et les variables explicatives sont pris en compte pour tester le coefficient V de Cramer pour chaque variable. LCM calcule le coefficient V de Cramer automatiquement et affiche le niveau d'association des variables explicatives avec les catégories de couverture terrestre. Les variables avec des valeurs plus importantes sont considérées comme plus importantes que les autres variables. Les valeurs V de Cramer comprises entre 0,15 et 0,40 sont considérées comme excellentes et bonnes, respectivement et les valeurs $< 0,15$ devraient être supprimées du modèle (Eastman, 2012). Deux variables topographiques (pente et altitude) et une variable de distance (route) ont des répercussions importantes sur le changement de couverture terrestre dans la zone d'étude, et celles-ci sont utilisées dans le modèle.

5.2.4.2. Traitements (modules)

Les sections traitements sont présentées avec les modules associés qui sont incorporés pour prédire les cartes de couverture terrestre future. La prédiction du changement d'occupation de sol dans la modélisation LCM se fait en plusieurs étapes que sont : l'analyse des changements, la modélisation des transitions potentielles et la prédiction des changements (Eastman, 2012).

5.2.4.2.1. Analyse des changements

Elle se base sur le changement historique de la date T_1 à la date T_2 des cartes d'occupation du sol pour projeter les scénarios futurs. L'analyse des changements est évaluée entre deux cartes d'occupation du sol à T_1 et T_2 (Koffi, 2022). Les changements identifiés sont la transition d'un état d'occupation du sol à un autre. Le nombre de transitions potentielles dépend du nombre de classe d'occupation du sol. La procédure d'allocation spatiale des changements d'occupation du sol se fait par affectation multi-objectif, qui se couple à l'estimation de la quantité de changement effectuée par des chaînes de Markov. L'affectation multi-objectif prend en compte la totalité des conversions afin de lister les catégories d'occupation du sol perdant en surface et celles gagnant sur les premières. Le résultat est une carte de transition potentielle pour chaque transition.

5.2.4.2.2. Modélisation du potentiel de transition

La modélisation du potentiel de transition est l'étape d'identification du potentiel des classes à se convertir en d'autres classes. Des cartes de potentiel de transition sont créées pour chaque possibilité en fonction de l'historique des changements et variables explicatives sélectionnées. Ces cartes de potentiel de transition sont organisées dans un sous-modèle de transition évaluée à l'aide des chaînes de Markov. Les transitions sont modélisées à l'aide d'un réseau neuronal de perception multi-couches. L'algorithme Multi-Layer Perceptron Neural Network d>IDRISI (Eastman, 2012) crée des potentiels de transition. Les transitions potentielles sont retenues lorsque le taux de précision est supérieur à 70%. Une fois calibré, le modèle est utilisé pour prédire les scénarios futurs.

5.2.4.2.3. Prédiction des changements d'occupation du sol

La prédiction des changements futurs est la dernière étape importante de la modélisation. En utilisant les taux historiques de changement et le modèle de potentiel de transition, LCM prédit les scénarios futurs pour une date future spécifiée (Koffi, 2022). Dans sa forme la plus simple, le modèle détermine comment les variables influencent les changements futurs, quelle variation a eu lieu entre les dates T_1 et T_2 , puis calcule les transitions potentielles à venir. La prédiction du changement d'occupation du sol comporte deux aspects principaux : la quantité de changement et la matrice de transition du modèle fournit par la chaîne de Markov. LCM fournit la quantité de changement en évaluant la matrice de Markov et compare l'occupation du sol initiale (1986) et l'occupation du sol finale (2020), puis prédit la future couverture terrestre à l'aide d'une matrice de probabilité de transition. La matrice de probabilité de transition affiche la probabilité que chaque catégorie d'occupation du sol se transforme en une autre catégorie.

Les matrices de probabilités fournissent le potentiel de changement de chaque catégorie sans répartition spatiale du changement. Ce potentiel est fourni par les cartes de potentiel de transition. Les cartes d'occupation futures sont produites en utilisant des cartes de potentiel de transition de la période historique précédente (1986-2003).

5.2.4.3. Validation du modèle

La validation d'un modèle est nécessaire pour évaluer sa précision de prédiction. Pour ce faire, une première carte d'occupation du sol est créée par le modèle pour l'année 2020, car nous disposons pour cette année, une carte d'occupation du sol (carte de référence). L'objectif ici est de comparer la carte simulée à la carte observée pour cette même date. Les observations visuelles et des calculs statistiques (erreurs quantitatives et de localisation) sont effectués sur le résultat du modèle. L'erreur quantitative est la différence entre la quantité de cellules dans une catégorie de couverture terrestre particulière dans une carte (prédit) et la quantité de cellules dans cette catégorie de l'autre carte (carte de référence), et l'erreur de localisation est l'écart spatial d'une catégorie dans une carte de la même catégorie dans une autre carte (Eastman, 2012). Les indices Kappa et l'analyse par matrice d'erreur sont incorporés dans l'étude pour la validation du modèle. L'indice Kappa standard est un processus analytique comparatif qui mesure les aspects spatiaux et non spatiaux entre les cartes prédites et les cartes de référence (Eastman, 2012). Les valeurs de Kappa sont excellentes pour des valeurs supérieures à 0,75, bonnes pour des valeurs comprises entre 0,40 et 0,75 et mauvaises lorsqu'elles sont inférieures à 0,40 (Eastman, 2012).

5.2.5. Application du modèle CEQUEAU au bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

L'application du modèle CEQUEAU au bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona nécessite la prise en compte de ses caractéristiques physiques. Cette option est rendue possible grâce à la discrétisation (découpage) du bassin versant en carreaux entiers et en carreaux partiels (Morin & Paquet, 2007). L'évaluation des écoulements dans bassin versant nécessite l'évaluation des caractéristiques physiographiques sur chaque carreau entier. Ces caractéristiques sont l'altitude du coin sud-ouest, le pourcentage de forêt, de lacs, de rivières et de marais. La subdivision des carreaux entiers en carreaux partiels à partir de lignes de partage permet de reproduire le cheminement de l'eau sur le bassin versant. Le modèle CEQUEAU n'admet que quatre carreaux partiels sur un carreau entier. Ces carreaux sont caractérisés par leurs superficies exprimées en pourcentage par rapport au carreau entier et le sens d'écoulement de l'eau. Ceux-ci permettent de :

- suivre dans le temps et dans l'espace la formation et l'évolution des écoulements ;
- fournir les débits à n'importe quel point du réseau de drainage ;
- introduire d'éventuelles modifications artificielles afin d'apprécier leurs impacts sur l'écoulement à l'exutoire des bassins (Konan, 2002 ; Payan, 2007).

L'ensemble des données physiographiques relatives aux carreaux entiers et partiels est traité par un programme qui constitue la banque de données physiographiques.

5.2.5.1. Principe de fonctionnement du modèle CEQUEAU

Le modèle CEQUEAU est un modèle hydrologique déterministe comportemental et à réservoirs qui remplace les équations phénoménologiques par des équations de comportement (remplissage, vidange des réservoirs). Il comprend deux parties qui concourent à la description du cheminement de l'eau vers l'exutoire du bassin versant. Il s'agit de la fonction de PRODUCTION et de la fonction de TRANSFERT. La fonction de PRODUCTION concerne l'écoulement vertical de l'eau, dont les principaux phénomènes sont les précipitations, la fonte des neiges, l'évapotranspiration, l'infiltration et les réserves superficielles et profondes. La fonction de PRODUCTION est calculée sur chaque carreau entier au pas de temps journalier. Quant à la fonction de TRANSFERT, elle concerne le transfert horizontal de l'écoulement dans le réseau de drainage. Ces processus tiennent compte de l'influence des lacs, des marécages et des ouvrages artificiels. La fonction de TRANSFERT s'effectue à partir des carreaux partiels. Pour réussir la simulation quantité ou quantité-qualité, le modèle CEQUEAU utilise les données déjà préparées (Morin & Paquet, 2007).

5.2.5.2. Traitement des données

5.2.5.2.1. Données physiographiques

C'est à partir du fichier des données générales des carreaux entiers et du fichier de données du bassin versant que l'on peut obtenir le fichier des données physiographiques préparées nécessaires aux simulations de quantité et de qualité des écoulements. Par ailleurs, le fichier des données des rivières est optionnel. Son absence n'empêche pas la simulation.

❖ Carreaux entiers

L'identification des carreaux entiers est obtenue à travers un repère orthonormé d'abscisse I et d'ordonnée J (I, J). La numérotation des mailles considère comme origine du repère le couple de coordonnées (I=10, J=10). Le couple de coordonnées (0 ; 0) a été écarté comme origine du repère afin d'éviter d'obtenir des coordonnées négatives si jamais des stations hors du bassin

sont utilisées (Morin *et al.*, 1995). Les données physiographiques à déterminer sur chaque carreau entier sont :

- le pourcentage de superficie recouverte par les lacs et les rivières ;
- le pourcentage de superficie recouverte par la forêt ;
- le pourcentage de superficie recouverte par les marais ;
- l'altitude du coin Sud-Ouest (carte d'altitude) permet d'obtenir la répartition des altitudes sur le domaine étudié. Pour ce faire, si le nœud se trouve sur une courbe de niveau, la côte de cette courbe lui est affectée directement. Sinon, une interpolation linéaire entre les altitudes est réalisée en tenant compte des 2 côtes sur les 2 courbes de niveau lorsque le nœud se trouve entre ceux-ci.

Les pourcentages de superficie recouverte par les lacs, les rivières, les forêts et les marais sont extraits des cartes d'occupation du sol à l'aide du logiciel MapInfo 10.

❖ Carreaux partiels

La figure 21 décrit la règle admise pour le découpage d'un carreau entier en carreaux partiels selon Morin & Paturel (2007) en ces étapes ci-dessous :

- dans le premier cas, s'il existe un seul réseau hydrographique sur le carreau entier, le partage en carreaux partiels n'est pas nécessaire.
- dans le deuxième cas, s'il existe plus d'un réseau dans le carreau entier, il sera nécessaire de pratiquer le partage en carreaux partiels.

Une fois le partage du carreau entier en carreaux partiels est achevé, ces derniers sont codifiés. A chaque carreau partiel est affecté un code A ou B ou C ou D. Ce codage est arbitraire. L'essentiel, c'est que les carreaux partiels d'un même carreau entier portent des codes différents.

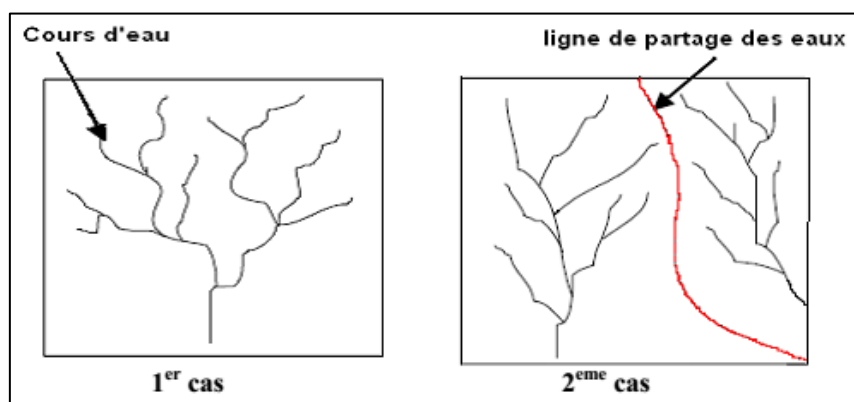


Figure 21: Partage des carreaux entiers en carreaux partiels (Morin & Paturel, 2007)

❖ Sens d'écoulement de l'eau

Le sens d'écoulement d'un carreau à un autre est un facteur qui permet de suivre le transfert de l'eau vers l'exutoire du bassin versant, indiqué par l'intermédiaire de flèches. Cette tâche est facilitée par l'utilisation du réseau hydrographique comme indiqué à la figure 18. Une règle est adoptée pour ce faire. C'est qu'au niveau d'un même carreau entier, il n'y a pas plus d'une flèche sortante. Dans un carreau partiel, il ne peut pas avoir plus de cinq entrées (critères exigés par le logiciel CEQUEAU) (Morin & Paquet, 2007).

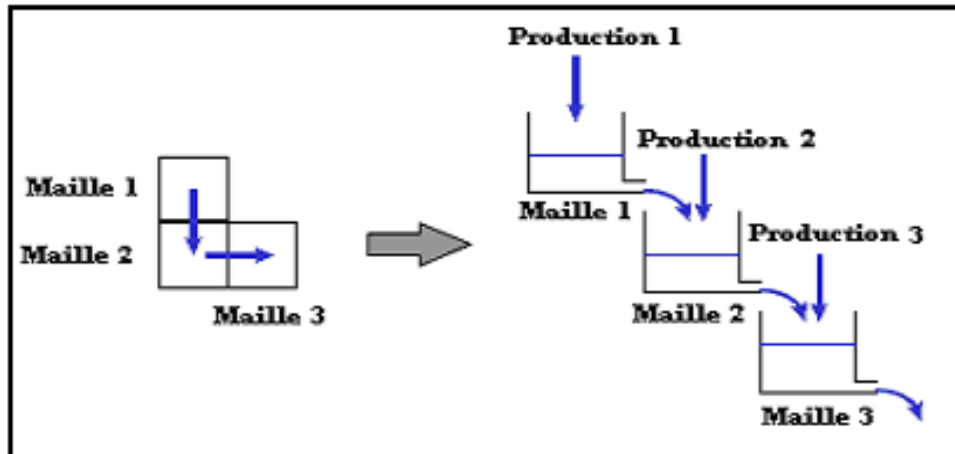


Figure 22 : Schématisation du transfert de l'eau d'une maille à l'autre (Morin & Paturel, 2007)

5.2.5.2.2. Données de bassin versant

Les données de bassin versant sont obtenues en repérant sur les cartes topographiques les coordonnées (I ; J) et le code du carreau entier ou partiel (A, B, C, D) des stations météorologiques du bassin versant étudié. Les stations hydrométriques dudit bassin sont également identifiées par leurs coordonnées (I ; J) et le code du carreau entier ou partiel où elles se situent tandis que les stations météorologiques sont repérées par les coordonnées (I ; J) uniquement. Les stations hydrométriques et météorologiques sont identifiées par leur numéro de référence inscrit dans le catalogue national des stations du pays. Ainsi, les 5 et 6 derniers chiffres du numéro sont retenus respectivement pour les stations hydrométriques et météorologiques pour des raisons de commodité (Morin & Paturel, 2007). Le numéro de la station hydrométrique de Sorotona est 00102. Quant aux stations météorologiques, les numéros sont de 005000 pour la station de Borotou Koro ; 016000 pour la station d'Odienné ; 020500 pour la station de Touba et 187000 pour la station de Beyla.

5.2.5.2.3. Données météorologiques et hydrométriques

Les simulations de quantité ont besoin de fichier de données hydrométriques et de données météorologiques préparées pour la période de simulation, en plus du fichier de données

physiographiques déjà préparé. Le traitement servant à la préparation de ce fichier tire ses directives du fichier des stations afin de recueillir et organiser les données contenues dans la base de données.

❖ **Données météorologiques**

Les fichiers de données météorologiques nécessaires au modèle au pas de temps journalier contiennent les informations suivantes :

- la température maximale de l'air, en degrés Celsius (C°) ;
- la température minimale de l'air, en degrés Celsius (C°) ;
- la précipitation liquide, en dixièmes de millimètres (mm) ;

Pour chaque année de données météorologiques disponibles, on a sur une première ligne le numéro de station, l'année, le pas de temps en heures, un code pour indiquer le format de lecture des données météorologiques et un autre code pour indiquer que les précipitations solides existent ou non.

❖ **Données hydrométriques**

Les fichiers des données de débits contiennent les informations de débits moyens journaliers par pas de temps journalier en m³/s. Pour chaque année de données de débits disponibles, on a sur une première ligne le numéro de station, l'année, le pas de temps en heures et un code pour indiquer le format de lecture des données hydrométriques.

5.2.5.2.4. Calage du modèle

Le calage du modèle CEQUEAU utilise trois à cinq années de données, bien que parfois une seule année peut être utilisée. Il est possible selon la taille du bassin, d'utiliser jusqu'à 100 stations météorologiques et 50 stations hydrométriques (Kouadio, 2011). Quatre (04) stations météorologiques et une (01) station hydrométrique ont été utilisées sur le bassin versant du Sassandra à Sorotona. Les paramètres et constantes du modèle CEQUEAU sont au nombre de 28 et regroupés en trois types comme l'indique le tableau X. Leur évaluation est faite par deux méthodes : la méthode par essais et erreurs et la méthode d'optimisation. Au calage, du modèle les deux méthodes sont utilisées et permettent à chaque simulation de définir la valeur optimale de chaque paramètre. Dans la pratique, lors d'un premier essai, les paramètres sont modifiés et les nouveaux résultats sont analysés. Ainsi, les paramètres sont modifiés jusqu'à l'obtention de résultats assez satisfaisants.

Tableau X : Paramètres et constantes du modèle CEQUEAU (Morin & Paturel, 2007)

| Paramètre | Paramètres déterminés par essai et erreur | | | |
|---|--|--|--|--|
| | Paramètres déterminés selon la physique du phénomène | | | |
| | Constantes déterminées à l'aide des caractères hydrologiques et physiographiques | | | |
| | Description | | | |
| Paramètres des réservoirs SOL-NAPPE-MARAIS | | | | |
| CIN* | | | | Coefficient d'infiltration du réservoir sol au réservoir NAPPE |
| CVMAR | | | | Coefficient de vidange du réservoir LACS et MARECAGES |
| CVNB* | | | | Coefficient de vidange du réservoir NAPPE (vidange basse) |
| CVNH* | | | | Coefficient de vidange du réservoir NAPPE (vidange haute) |
| CVSB | | | | Coefficient de vidange du réservoir SOL (Vidange basse) |
| CVSI* | | | | Coefficient de vidange du réservoir SOL (Vidange haute) |
| HINF* | | | | Seuil d'infiltration vers le réservoir NAPPE |
| HINT* | | | | Seuil de vidange intermédiaire du réservoir SOL |
| HMAR | | | | Seuil de vidange du réservoir LACS et MARECAGES |
| HNAP* | | | | Seuil de vidange du réservoir NAPPE |
| HRMP* | | | | Hauteur de précipitation pour qu'il y ait ruissellement sur les surfaces imperméable |
| HSOL* | | | | Hauteur du réservoir SOL |
| Paramètres régissant la fonte de neige | | | | |
| STRNE | | | | Seuil de transformation pluie-neige |
| TFC | | | | Taux de fonte en forêt |
| TFD | | | | Taux de fonte en clairière |
| TSC | | | | Seuil de température de fonte en forêt |
| TSD | | | | Seuil de température de fonte en clairière |
| TTD | | | | Coefficient de déficit calorifique de la neige |
| TTS | | | | Seuil de mûrissement du stock de neige |
| Paramètres qui gouvernent l'évapotranspiration | | | | |
| EVNAP | | | | Pourcentage d'évapotranspiration pris dans le réservoir NAPPE |
| HPOT* | | | | Seuil de prélèvement de l'eau à taux potentiel |
| XAA | | | | Exposant de la formule de Thornthwaite |
| XIT | | | | Valeur de l'index thermique de Thornthwaite |
| Paramètres et constantes de transfert | | | | |
| EXXKT | | | | Paramètre d'ajustement du coefficient de transfert |
| ZN | | | | Termes de concentration du bassin |
| Paramètres et constantes divers | | | | |
| COET | | | | Coefficient de correction des températures avec l'altitude |
| COEP | | | | Coefficient de correction des précipitations avec l'altitude |
| FACT | | | | Facteur modifiant les précipitations moyennes sur un ensemble de carreaux entier |
| JOEVA | | | | Variable décalant la date d'insolation potentielle maximale respectivement pour |
| JONEI | | | | l'évapotranspiration et pour la neige |
| XINFMA | | | | Infiltration maximale par jour |
| XLA | | | | Latitude moyenne du bassin versant |
| TRI* | | | | Pourcentage de surface imperméable |

(*) La valeur de ces paramètres peut être variable dans l'espace

5.2.5.2.5. Critères du calage

La vérification de l'ajustement du modèle se fait par l'analyse des critères numériques et des critères graphiques.

❖ Critères numériques

Les critères numériques sont calculés dans le souci d'apprécier la prévision de la simulation.

Ainsi, à chaque simulation, le modèle CEQUEAU compare :

- la lame d'eau annuelle observée et calculée ;
- la lames d'eau mensuelle observée et calculée ;
- le débit journalier maximal observé et calculé.

Afin de quantifier la précision des résultats, le modèle adopte trois critères d'appréciation (Kouadio, 2011) :

- le coefficient de corrélation qui se définit par l'équation 25 suivante :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (q_{ci} - \bar{q}_c)(q_{oi} - \bar{q}_o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (q_{ci} - \bar{q}_c)^2 \sum_{i=1}^n (q_{oi} - \bar{q}_o)^2}} \quad \text{Équation (25)}$$

où : q_{ci} et q_{oi} sont respectivement les débits calculés et observés au jour i ;

\bar{q}_c et \bar{q}_o sont les moyennes respectives de q_{ci} et q_{oi} sur les n jours servant au calcul du coefficient.

- le coefficient de Nash (NTD) qui se définit par l'équation 26 suivante :

$$NTD = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (q_{ci} - q_{oi})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (q_{oi} - \bar{q}_o)^2}} \quad \text{Équation (26)}$$

Ce coefficient représente l'unité moins le rapport de la variance résiduelle à la variance des débits observés. Lorsque les débits simulés q_{ci} sont identiques aux débits observés q_{oi} , il vaut 1. A mesure que la différence entre les débits calculés et observés s'accroît, le coefficient de Nash décroît et peut même devenir négatif. A la fin de la simulation, le modèle compare pour chacune des stations hydrométriques les débits observés et simulés calculés, à l'échelle journalière et mensuelle.

- l'erreur relative quadratique moyenne (Er) est définie par l'équation 27 comme suit :

$$Er = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_{oi} - q_{ci}}{q_{oi}} \right) \quad \text{Équation (27)}$$

❖ Critères graphiques

L'adéquation entre observations et simulations peut également être appréhendée à l'aide des graphiques qui permettent de vérifier le synchronisme entre les débits calculés et observés (Koffi, 2022). Quatre critères graphiques sont utilisés :

- graphique des débits simulés et observés en fonction du temps (échelle linéaire), et considéré comme le plus important ;
- graphique du cumul des résidus (débits observés – débits simulés) en fonction du temps
- graphique de la courbe des débits classés ;
- graphique de la dispersion des débits observés et simulés.

5.2.6. Scénarios de simulation des écoulements dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

Le modèle hydrologique CEQUEAU, une fois calé et validé permet de simuler les écoulements dans le bassin versant à Sorotona. Au cours de la simulation des écoulements, les cartes d'occupation du sol (1986, 2003, 2020, 2034 et 2054) ont servi de support pour le modèle. Les simulations sont effectuées en temps réels et deux scénarios sont réalisés. Le premier scénario examine les écoulements obtenus à partir des cartes d'occupation passées, puis une comparaison est faite avec les débits observés. Durant cette simulation, les paramètres climatiques observés sont maintenus constants mais les cartes d'occupation du sol de 1986, 2003 et 2020 sont utilisées. Le deuxième scénario génère des écoulements futurs par la combinaison des données climatiques futures (2021-2040 et 2041-2060) et de l'occupation du sol des années 2034 et 2054. Ainsi, la mise en place de plusieurs hypothèses de simulation permet de simuler les écoulements en temps réel dans le bassin versant du Sassandra à Sorotona.

5.2.7. Évaluation de la disponibilité future en eau dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

Les débits moyens journaliers simulés à la station hydrométrique de Sorotona permettent d'évaluer si la quantité d'eau dont dispose le fleuve Sassandra à Sorotona peut garantir une fourniture en eau durable pour l'irrigation des plantations de canne à sucre existantes et les plantations à créer. L'évaluation de la ressource en eau s'est faite à l'échelle journalière, ramenée à la décennie. Ceci permet de prendre en compte les variations réelles de la rivière selon les saisons climatiques et tient compte des différents stades phénologiques de la croissance de la canne à sucre. En outre, l'évaluation a pris en compte les fluctuations interannuelles des écoulements afin d'estimer les quantités d'eau susceptibles d'être mobilisées en période sèche ou humide. La disponibilité de la ressource en eau a été analysée par le biais des débits réservés, des débits moyens annuels et des débits prélevables.

5.2.7.1. Débit réservé

Le débit réservé ou débit minimum biologique est le débit minimal à maintenir en permanence dans un cours d'eau au droit de l'ouvrage pour sauvegarder les équilibres biologiques et les usages de l'eau en aval. Le débit réservé n'est pas une notion hydrologique mais plus une contrainte réglementaire. Dans la pratique, ce débit réservé est égal au dixième du module annuel du Code de l'eau en 2023.

5.2.7.2. Débit prélevable

On obtient le débit prélevable en retirant le débit brut du débit réservé. La quantité d'eau disponible varie en fonction des périodes de l'année.

5.3. Établissement du rapport entre les besoins et la disponibilité de l'eau dans le complexe sucrier de Borotou-Koro

5.3.1. Détermination du besoin en eau de la canne à sucre dans le complexe sucrier de Borotou Koro

Le besoin en eau d'une culture est la quantité d'eau nécessaire pour couvrir les pertes en eau par évapotranspiration de cette culture saine, cultivée en grande parcelle, sans contraintes du sol et réalisant son potentiel de production sous les conditions optimales. Donc, le besoin en eau d'une culture correspond à l'évapotranspiration maximale de cette culture (ET_c). Cette dernière dépend de la demande climatique qui est appelée évapotranspiration potentielle (ETP) ou de référence (ET_0).

5.3.1.1. Détermination des évapotranspirations dans le complexe sucrier de Borotou-Koro

5.3.1.1.1. Évapotranspiration Potentielle (ETP) ou de référence (ET_0)

L'évapotranspiration d'un sol couvert de végétation est difficile à estimer. Selon Allen *et al.* (1998), la détermination de l'ETP peut être estimée directement. C'est le cas des bacs d'évaporation, ou indirectement à l'aide des formules empiriques et théoriques qui combinent des variables climatiques. Dans cette étude, les deux types de détermination ont été utilisées. En effet, la méthode directe est utilisée pour les observations journalières et la méthode indirecte est appliquée pour l'estimation aux horizons futurs. La détermination directe par le bac d'évaporation "Classe A" présente l'avantage d'une installation très simple. Dans ce cas les résultats ne sont faussés par le rejaillissement des gouttes de pluie qui tombent sur le terrain avoisinant. Par contre, ils sont très sensibles aux variations de la température de l'air et aux effets de l'insolation. Le bac dit "Classe A", utilisé par le Service d'Etude Agronomique de

Sucrivoire est constitué d'un cylindre métallique de 1220 mm de diamètre et de 254 mm de hauteur. Dans ce cylindre, on maintient une épaisseur d'eau de 175 à 200 mm. Le cylindre est supporté par un support à 15 cm du sol. Ce support doit permettre une bonne aération sous le bac, et empêcher la transmission d'énergie thermique entre le sol et le bac qui pourrait fausser les résultats. Selon Skhiri (2019), la mesure de l'ET_o par la méthode du bac d'évaporation classe A, se fait au moyen de l'équation 28 comme suit :

$$ET_o = E_{bac} \times K_{bac} \quad \text{Équation (28)}$$

où

ET_o : évapotranspiration potentielle où de référence ;

K_{bac} : coefficient de conversion (varie de 0,7 à 0,8) ;

E_{bac} : évaporation du bac.

Le choix de la valeur du coefficient du bac (K_{bac}) se fait suivant un tableau qui prend en compte la vitesse du vent (m/s), l'humidité relative (%) et la distance du bac par rapport au gazon (m). Pour ce qui est de la détermination indirecte, plusieurs formules sont citées telles que la formule de Blaney & Criddle (1962) et la formule de Turc (1961). Selon FAO, la méthode de Penman-Monteith est indiquée comme étant la méthode qui permet de déterminer l'évapotranspiration de référence ET_o. Elle est considérée comme étant la méthode la plus utilisée pour n'importe quel type de climat et de région.

5.3.1.1.2. Évapotranspiration maximale de cultures (ET_c)

L'évapotranspiration maximale de cultures est définie à différents stades de développement de la culture sous les conditions agronomiques optimales, c'est-à-dire sans maladie et sans stress hydrique ni nutritionnel. Ce paramètre est obtenu à partir de l'équation 29 suivante :

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad \text{Équation (29)}$$

ET_c est liée à ET_o par l'intermédiaire d'un coefficient K_c appelé coefficient cultural qui tient compte de la différence physique et physiologique entre la surface de référence et la culture donnée.

5.3.1.2. Détermination des besoins nets et besoins en eau d'irrigation

La formule de base déterminant le besoin net est déduite par la méthode du bilan hydrique exprimé par Skhiri (2019) dont l'expression est présentée par l'équations 30.

$$B_{net} = (ET_c - P_{eff} \pm \Delta S) \times Sup \times 10 \quad \text{Équation (30)}$$

avec,

B_{net} : Besoin net (m^3/ha) ;

ET_c : Evapotranspiration maximale de la culture (mm) ;

p_{eff} : Pluie efficace (mm) ;

ΔS : Variation de stock (mm).

Sup : Superficie (ha)

Pour calculer les besoins en eau d'irrigation, il faut tenir compte de l'efficacité du réseau ($E_{\text{réseau}}$) d'irrigation. L'équation 31 illustre l'expression du besoin en eau d'irrigation.

$$B_{\text{irri}} = \frac{(ET_c - P_{\text{eff}} \pm \Delta S) \times \text{Sup} \times 10}{E_{\text{réseau}}} \quad \text{Équation (31)}$$

avec,

B_{irri} : Besoin en eau d'irrigation (m^3/ha) ;

ET_c : Evapotranspiration maximale de la culture (mm) ;

p_{eff} : Pluie efficace (mm) ;

ΔS : Variation de stock (mm) ;

Sup : Superficie (ha)

$E_{\text{réseau}}$: Efficacité du réseau d'irrigation.

5.3.2. Coefficient cultural (K_c)

Le coefficient cultural (K_c) représente une intégration des caractéristiques qui distinguent l'évapotranspiration d'une culture donnée (ETM), de l'évapotranspiration de référence (ET0). Il est largement affecté par la nature de la culture, sa hauteur, sa durée de cycle, et son taux de croissance. Selon Allen *et al.* (1998), le coefficient cultural est largement affecté par plusieurs facteurs tels que :

- l'aérodynamique liée à la hauteur et à la densité de la végétation ;
- la biologie liée à la croissance et à la sénescence des feuilles ;
- la physique liée principalement à l'évaporation du sol ;
- la physiologie liée à la réponse des stomates à la pression de vapeur saturante ;
- l'agronomie liée aux pratiques culturales (système d'irrigation, fréquence des pluies et d'irrigation).

Les valeurs de K_c sont souvent données pour chaque culture, tout en tenant compte des diverses phases de croissance.

5.3.3. Détermination des besoins futurs en eau de la canne à sucre

Le programme de détermination sur tableur Excel estime les besoins théoriques en eau d'irrigation des parcelles à l'échelle des différents secteurs de l'exploitation. L'organigramme fonctionnel du programme est présenté à la figure 19. Ainsi, le jour où l'irrigation est possible, le programme estime la dose (élément final du processus de calcul) en faisant appel à différents paramètres : le besoin net en eau, le stock initial, la pluie, la date de plantation. Les volumes en eau d'irrigation sont calculés par fraction de parcelle et synthétisés en dose en fonction de la demande. Les besoins en eau d'irrigation sont calculés pour chaque parcelle de l'exploitation en fonction des paramètres cités ci-dessus. Les estimations sont réalisées par campagne agricole (du 1er Octobre au 31 Septembre). Les résultats quotidiens du bilan hydrique sont ensuite synthétisés en fonction des fréquences demandées (décadaire, mensuelle et annuelle) pour chaque campagne. Les besoins sont calculés pour une unité de surface (ha). Les volumes ainsi obtenus intègrent l'efficacité du système d'irrigation dans la parcelle.

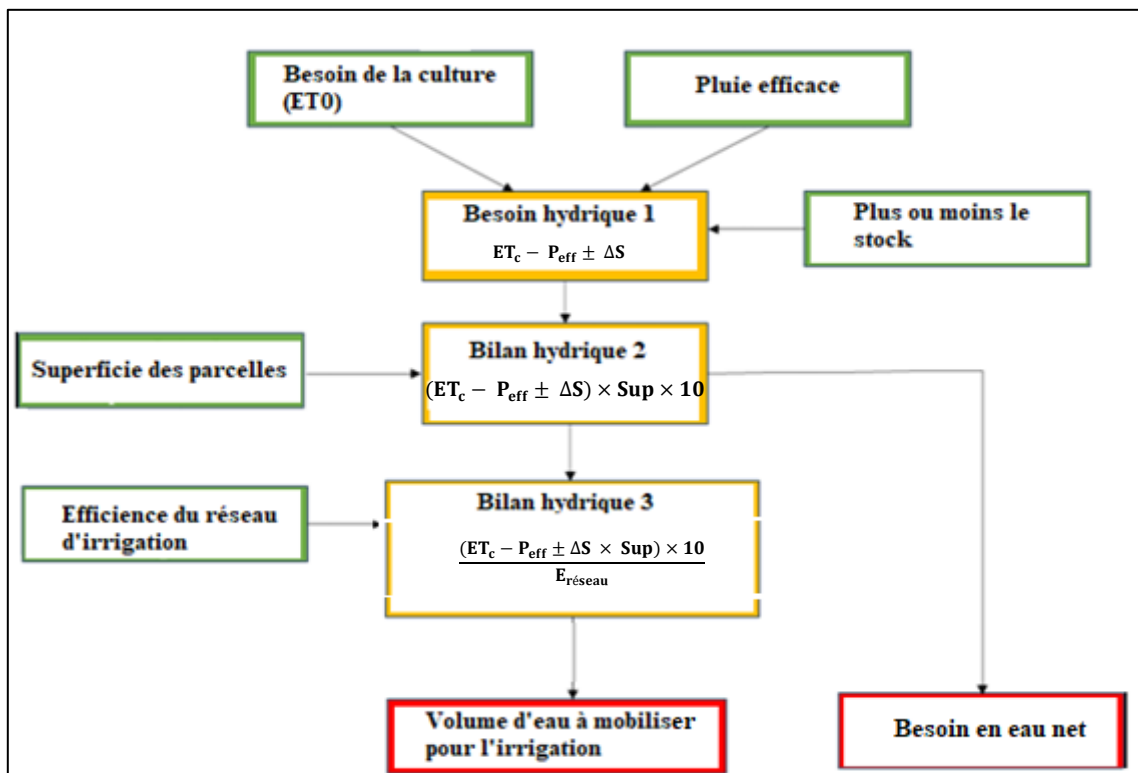


Figure 23 : Programme de détermination des besoins en eau de la canne à sucre.

Conclusion partielle

Cette partie a permis de présenter les différentes approches méthodologiques employées dans cette étude. Les méthodologies ont concerné dans un premier temps l'étude des paramètres agroclimatiques et leur impact sur la production de la canne à sucre. Ensuite, l'évaluation de la disponibilité de la ressource en eau pour l'irrigation des plantations de canne à sucre à l'aide du

modèle hydrologique CEQUEAU, en passant par la caractérisation de l'occupation du sol actuelle et future. Enfin d'établir le rapport entre la disponibilité en eau et les besoins de la canne à sucre pour la pérennisation de la production de la canne à sucre.

L'utilisation du matériel et l'application des méthodes ont permis d'obtenir des résultats. La présentation de ces résultats et leur discussion font l'objet de la troisième partie.

PARTIE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE 6 : ÉTUDE DE LA CARACTÉRISATION DES PARAMÈTRES AGROCLIMATIQUES DANS LE BASSIN VERSANT DU FLEUVE SASSANDRA À SOROTONA

Ce chapitre présente les résultats de la caractérisation des paramètres agroclimatiques dans le bassin versant. Ces résultats ont été corrélés aux paramètres agronomiques pour en déduire leur impact sur la production de la canne à sucre. Il présente aussi le calendrier cultural proposé sur la base des données climatiques, à l'issue des observations. Enfin, les résultats de la projection des données climatiques futures sont présentés.

6.1. Caractérisation des paramètres agroclimatiques dans le bassin versant et leur impact sur la culture de canne à sucre

6.1.1. Analyse du début de la saison des pluies (DSP)

Les dates des démarrages de la saison pluvieuse sont illustrées par la figure 24 dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona. L'analyse des graphes de la figure et du tableau XI montrent une variation des dates de démarrage des pluies dans le bassin versant sur la période d'étude 1970-2020. À la station de Borotou Koro (Figure 24a), les débuts de pluie sont enregistrés entre la première décennie d'avril et la deuxième décennie de juillet. À cette station, deux grandes périodes de démarrage de pluie sont observées. La première période part de 1970 à 2001 où les dates de démarrage sont comprises entre la première décennie d'avril et la deuxième décennie de mai. La deuxième période s'étend de 2002 à 2020 avec des pluies qui débutent entre la troisième décennie d'avril et la première décennie de juin. À la station de Borotou Koro, les pluies s'installent en moyenne le 24 avril de l'année. À la station d'Odienné (Figure 24b), on observe une variation des dates de démarrage de la saison des pluies. Les pluies débutent à cette station en moyenne à la première décennie du mois de mai de l'année. Mais, elles enregistrent toutes des départs précoces à partir de la première décennie d'avril et des départs tardifs qui se prolongent jusqu'à la fin de la première décennie de juin. À la station de Touba (Figure 24c), les débuts de la saison des pluies sont généralement situés à la deuxième décennie d'avril. On note également des démarrages tardifs récurrents à la deuxième décennie de juin tout comme à Odienné. Enfin, à la station de Beyla (Figure 24d), les dates de démarrage des pluies sont similaires à celles de la station d'Odienné, à la différence que les départs tardifs s'étendent jusqu'à la troisième décennie de juin.

Tableau XI : Tableau récapitulatif de la variation des dates de début de la pluie aux stations climatiques étudiées sur le bassin versant.

| Stations climatiques | Début de la saison des pluies | | Démarrage moyen | Ecart entre les démarrages précoces et tardifs |
|----------------------|-------------------------------|---------|-----------------|--|
| | Précoce | Tardif | | |
| Borotou-Koro | 01-avr | 12-juil | 24-avr | 102 |
| Odienné | 01-avr | 27-juin | 01-mai | 87 |
| Touba | 10-avr | 17-juin | 22-avr | 68 |
| Beyla | 01-avr | 27-juin | 01-mai | 87 |

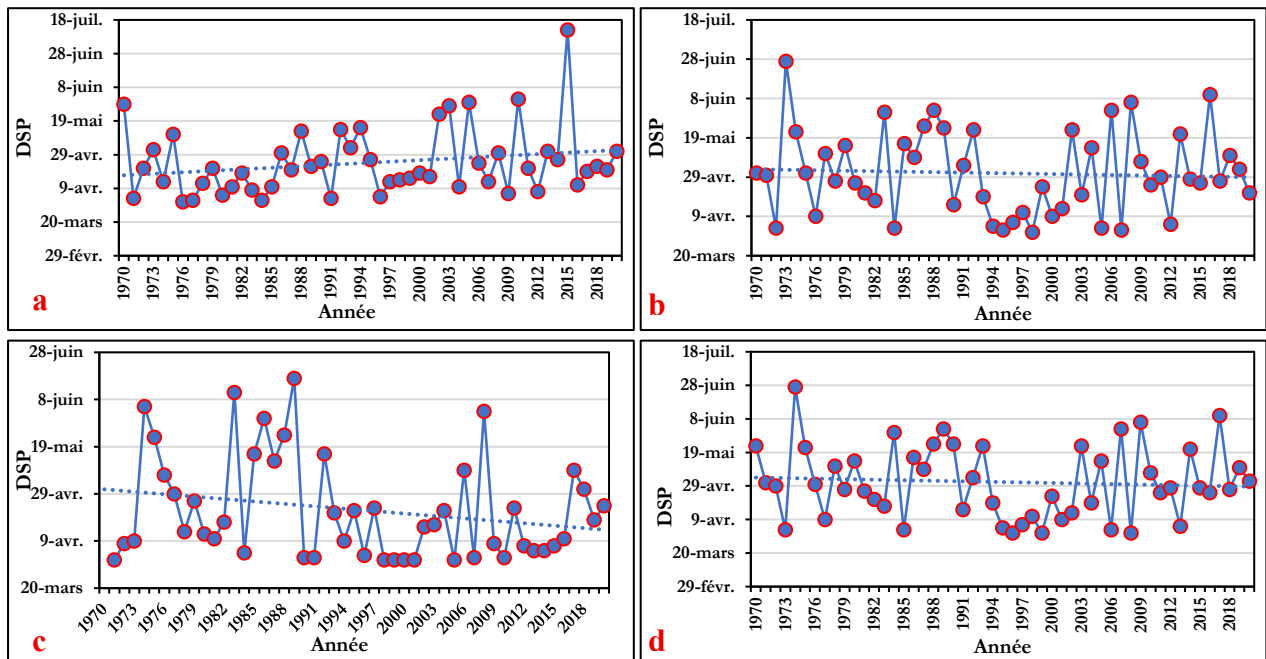


Figure 24: Évolution des dates de début de la saison des pluies à la station de Borotou-Koro (a) ; Odienné (b) ; Touba (c) et Beyla (d) au cours de la période 1970-2020.

6.1.2. Analyse de la fin de la saison des pluies (FSP)

La distribution des dates de fin de saisons présentée à la figure 25 et dans le tableau XII, montre une répartition assez hétérogène des dates de fin de saison des pluies dans l’ensemble du bassin versant. Cette hétérogénéité se traduit essentiellement par des dates de fin de saison très variables d’une année à une autre. À la station de Borotou Koro (Figure 25a), les dates de fin de saison des pluies sont graduelles et s’étendent de plus en plus vers les mois précédant le mois d’octobre. La fin de la saison des pluies oscille entre la troisième décade de septembre et la deuxième décade de novembre. De façon générale, le mois d’octobre correspond à la fin de la saison des pluies. À Odienné (Figure 25b) et à Touba (Figure 25c), les fins des saisons restent aussi instables sur la période d’étude. Elles oscillent entre la première décade d’octobre et la deuxième décade de novembre de l’année, avec des fins précoces qui sont de plus en plus repandues sur la dernière décade de septembre. Cependant, à la station de Touba, les fins de saisons des pluies tardives se font remarquer sur la période d’étude. À Beyla (Figure 25d), les fins de saison des pluies se situent entre la troisième décade d’octobre et la deuxième de

novembre de chaque année. Sur la période d'étude, les dates de fins de saison sont variables, mais restent concentrées au mois d'octobre.

Tableau XII : Tableau récapitulatif de la variation des dates de fin de la saison des pluies aux stations climatiques étudiées sur le bassin versant

| Stations climatiques | Fin de la saison des pluies | | Fin moyenne | Ecart entre les fins précoces et tardives |
|----------------------|-----------------------------|---------|-------------|---|
| | Précoce | Tardive | | |
| Borotou-Koro | 01-oct | 17-nov | 20-oct | 47 |
| Odienné | 01-oct | 25-nov | 22-oct | 55 |
| Touba | 01-oct | 19-nov | 18-oct | 49 |
| Beyla | 01-oct | 07-nov | 22-oct | 37 |

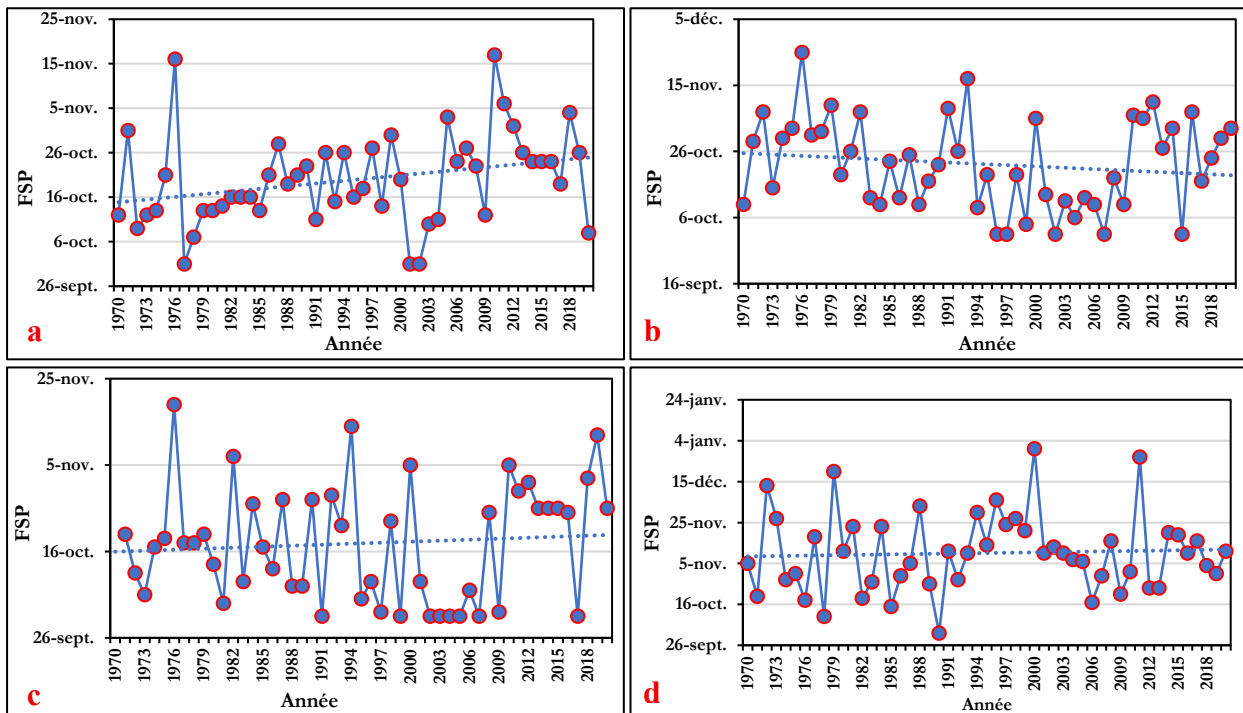


Figure 25: Évolution des dates de fin de la saison des pluies à la station de Borotou-Koro (a) ; Odienné (b) ; Touba (c) et Beyla (d) au cours de la période 1970-2020.

6.1.3. Analyse de la longueur de la saison des pluies (LSP)

Afin de mieux appréhender les instabilités intra-saisonniers, la variation des longueurs des saisons pluvieuses est présentée à la figure 26 et au tableau XIII. L'analyse du graphe montre qu'à la station de Borotou Koro (Figure 26a), la longueur moyenne de la saison des pluies est de 179 jours soit environ 18 décades. Cependant, des événements particuliers restent remarquables sur la période 1970-1980 où la LSP atteint un maxima de 230 jours. La longueur des saisons a atteint son niveau minima de 124 jours. À la station d'Odienné (Figure 26b), la longueur des saisons pluvieuses fluctue entre 270 et 330 jours. Mais fort est de constater que de 1984 à 2009, la saison des pluies a connu une forte diminution en nombre de jours. Par contre, à la station de Touba (Figure 26c), la longueur des saisons connaît une augmentation en nombre

de jour (entre 113 jours et 219 jours). La période 1982-1990 reste la plus perturbée avec des écarts significatifs dans la chronique des longueurs de saisons. Cependant, les longueurs moyennes saisonnières de jours pluvieux tournent autour de 178 jours soit environ 18 décades. Enfin à la station de Beyla (Figure 26d), la longueur des saisons reste très variable oscillant entre 110 jours et 230 jours. On remarque sur la période 1970-1983, l'aspect péjoratif de la durée des saisons avec le minima atteint en 1974 (110 jours) et le maxima en 1977 (230 jours).

Tableau XIII : Tableau récapitulatif de la variation des longueurs de la saison des pluies aux stations climatiques étudiées sur le bassin versant

| Stations climatiques | Longueur de la saison des pluies | | Longueur moyenne | Ecart entre les longueurs minimales et maximales |
|----------------------|----------------------------------|----------|------------------|--|
| | Minimale | Maximale | | |
| Borotou-Koro | 124 | 229 | 179 | 105 |
| Odienné | 175 | 230 | 196 | 55 |
| Touba | 113 | 219 | 178 | 106 |
| Beyla | 110 | 230 | 174 | 120 |

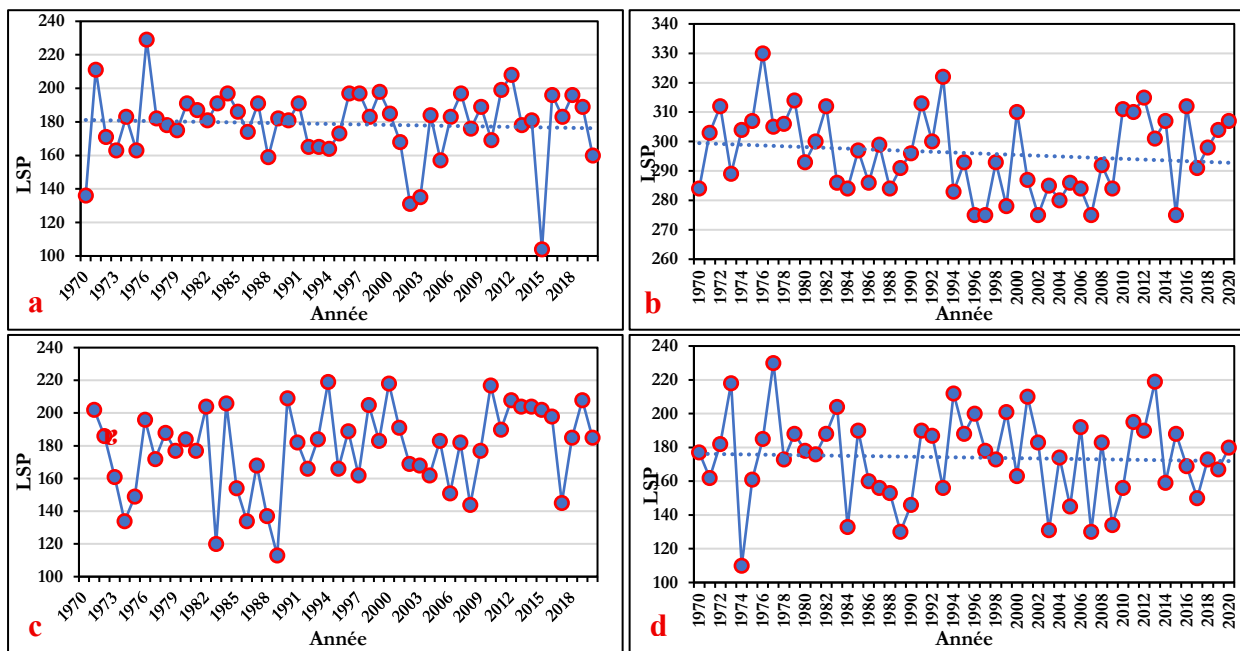


Figure 26 : Évolution des longueurs de la saison des pluies à la station de Borotou-Koro (a) ; Odienné (b) ; Touba (c) et Beyla (d) au cours de la période 1970-2020.

6.1.4. Nombre de jours de pluie (NJP)

La figure 27 et la tableau XIV présentent la variation du nombre de jour de pluie dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona. Le nombre de jour de pluie est caractérisé par une distribution asymétrique des amplitudes aux différentes stations. On remarque à la station de Borotou-Koro (Figure 27a) que les jours de pluie restent importants. Ces jours varient entre 111 et 196 jours avec une moyenne saisonnière de 158 jours. Le graphe de cette station de Borotou-

Koro fait remarquer une diminution considérable des NJP en 2002, 2003 et 2015. La station d’Odienné (Figure 27b), enregistre le plus de jour mouillé au cours de la saison des pluies. En effet, 162 jours en moyenne par saison restent pluvieux avec des jours intra-saisonniers qui varient entre 132 et 191 jours. Il faut signaler que dans leurs évolutions, les jours de pluie ont régressé de leurs nombres entre 1995 et 2009. Par contre à la station de Touba (Figure 27c) et à la station de Beyla (Figure 27d), on enregistre les plus faibles nombres de jours de pluie dans le bassin versant avec une moyenne de 145 jours sur la période d’étude. À Touba, le nombre de jours pluvieux chute en dessous de 120 jours sur 7 saisons. Quant à la station de Beyla, elle connaît cette régression de jour pluvieux à partir de 1984.

Tableau XIV : Tableau récapitulatif de la variation du nombre de jour de pluie aux stations climatiques étudiées sur le bassin versant

| Stations climatiques | Nombre de jour de pluie | | Nombre moyen | Ecart entre le nombre minimale et maximale |
|----------------------|-------------------------|---------|--------------|--|
| | Minimal | Maximal | | |
| Borotou-Koro | 111 | 196 | 158 | 85 |
| Odienné | 132 | 191 | 162 | 59 |
| Touba | 105 | 199 | 148 | 94 |
| Beyla | 101 | 198 | 142 | 97 |

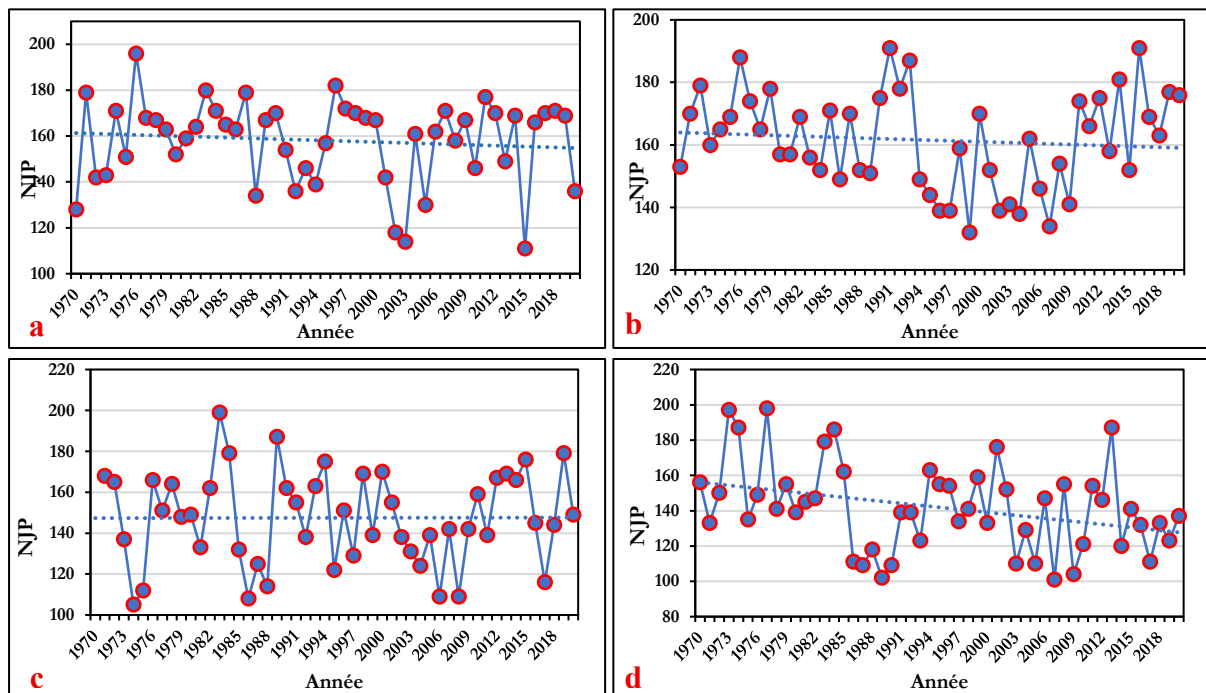


Figure 27 : Évolution des nombres de jours de pluie à la station de Borotou-Koro (a) ; Odienné (b) ; Touba (c) et Beyla (d) au cours de la période 1970-2020.

6.1.5. Cumul de précipitation saisonnière (CPS)

Le suivi des cumuls pluviométriques mis en évidence à la figure 28 et au tableau XV, souligne clairement un déséquilibre des quantités d’eau précipitées dans la zone d’étude. La répartition des cumuls saisonniers observés est très hétérogène sur l’ensemble du bassin versant. À la

station de Borotou-Koro (Figure 28a), on enregistre des cumuls saisonniers qui oscillent entre 700 et 1500 mm. Dans cette zone du bassin versant, deux principales périodes sont remarquées ; la période 1970-2004 où les cumuls saisonniers sont faibles avec des hauteurs moyennes de 1020 mm de pluies et la période 2004-2020 avec des hauteurs moyennes de 1113 mm. La station d'Odienné (Figure 28b) affiche une tendance pluviométrique en régression de 1970 à 2008. À partir de 2009, on observe une hausse des quantités de pluie qui atteignent 1665 mm, avec une moyenne saisonnière inférieure à 500 mm. À la station de Touba (Figure 28c), les hauteurs de pluie sont les plus dispersées et les plus instables. Le graphe présente une succession de pics bien prononcés correspondant des maximas de pluies. Cette observation, traduit le caractère péjoratif de la pluie dans cette zone du bassin versant avec des pluies qui oscillent entre 465 et 1589 mm. La station de Beyla (Figure 28d) affiche une répartition irrégulière des hauteurs des pluies saisonnières comme les autres stations. Cependant, les hauteurs de pluie sont plus importantes que celles des autres stations de tout le bassin versant. Elles fluctuent entre 976 et 1688 mm avec une moyenne de 1325 mm. De façon générale sur la période d'étude 1970-2020 les pluies sont en régression.

Tableau XV : Tableau récapitulatif de la variation du cumul de précipitation saisonnier aux stations climatiques étudiées sur le bassin versant

| Stations climatiques | Cumul de précipitation saisonnier (mm) | | Cumul moyen | Ecart entre le cumul minimal et maximal |
|----------------------|--|---------|-------------|---|
| | Minimal | Maximal | | |
| Borotou-Koro | 799 | 1460 | 1047 | 661 |
| Odienné | 503 | 1688 | 1075 | 1185 |
| Touba | 463 | 1587 | 964 | 1124 |
| Beyla | 976 | 1688 | 1325 | 712 |

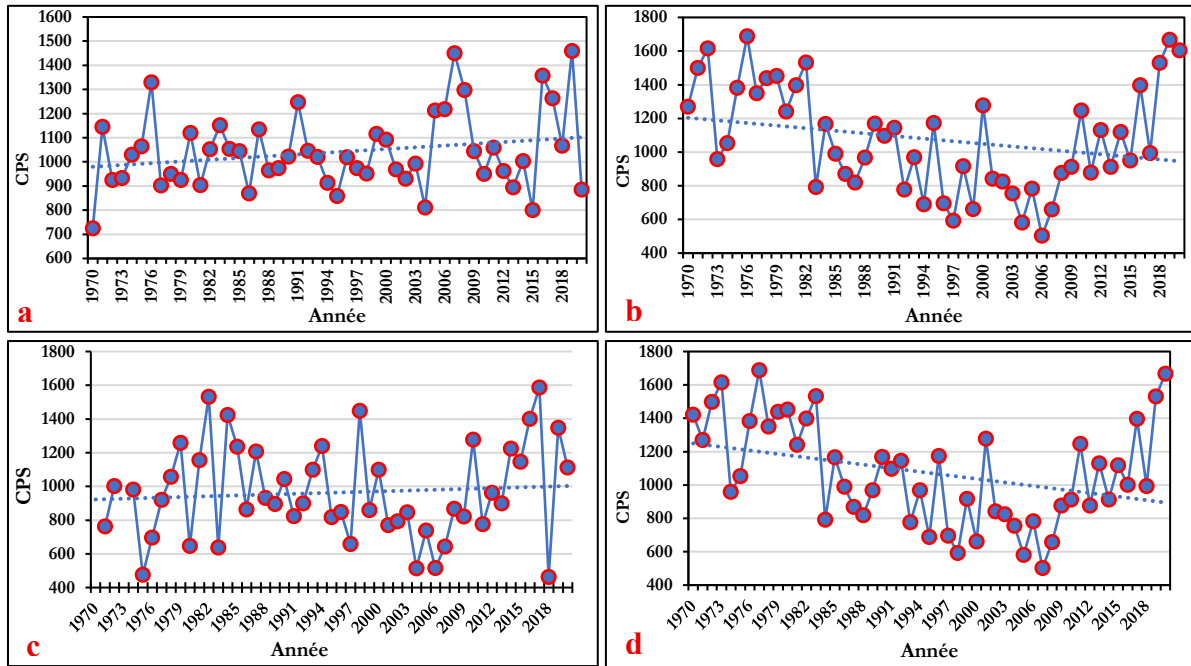


Figure 28 : Évolution des cumuls de précipitation saisonniers à la station de Borotou-Koro (a) ; Odienné (b) ; Touba (c) et Beyla (d) au cours de la période 1970-2020.

6.1.6. Hauteur journalière moyenne des précipitations (HMP)

La figure 29 et le tableau XVI présentent l'évolution des hauteurs journalières moyennes des précipitations au cours des saisons de pluie sur la période 1970-2020. Les intensités moyennes calculées aux stations étudiées dans le bassin versant s'étendent de 9,4 à 16,65 mm/jour. Les intensités de pluie les plus élevées sont enregistrées aux stations de Borotou-Koro et de Touba. À la station de Borotou-Koro (Figure 29a), les pluies journalières saisonnières varient entre 11,22 et 17,41 mm/jour. Dans leur évolution, les intensités de pluie ont connu deux périodes. La première période relativement stable se situe entre 1970 et 2002 où les intensités de pluies sont situées entre 15 et 16 mm/jour. La deuxième période qui s'étend de 2003 à 2020, connaît des perturbations qui se manifestent par la dispersion et la chute des quantités de pluie journalière. Au cours de cette période, les faibles intensités de pluies sont atteintes. À la station de Touba (Figure 29c) par contre, les intensités de pluie les plus importantes sont atteintes sur la période 1970-1981. À partir de 1982 jusqu'en 2020, on constate une diminution de ces intensités de pluie autour de 15,4 mm/jour. Aux stations d'Odienné (Figure 29b) et de Beyla (Figure 29d), on enregistre les intensités de pluie les plus faibles. Les intensités de pluie à la station d'Odienné restent majoritairement stationnaires entre 9 et 16 mm/jour. À la station de Beyla, la hauteur maximale de pluie (16,21 mm/jour) obtenue en 1983 va connaître une regression discontinue jusqu'à atteindre la hauteur de 9,44 mm/jour en 2014. Après 2014, on constate un retour à la hausse des pluies à cette station jusqu'en 2020.

Tableau XVI: Tableau récapitulatif de la variation des hauteurs journalières moyennes de pluie aux stations climatiques étudiées sur le bassin versant

| Stations climatiques | Hauteur journalière moyenne (mm) | | Hauteur moyenne | Ecart entre les hauteurs minimales et maximales |
|----------------------|----------------------------------|----------|-----------------|---|
| | Minimale | Maximale | | |
| Borotou-Koro | 11 | 17 | 16 | 6 |
| Odienné | 9 | 16 | 13 | 7 |
| Touba | 10 | 29 | 17 | 19 |
| Beyla | 9 | 17 | 13 | 8 |

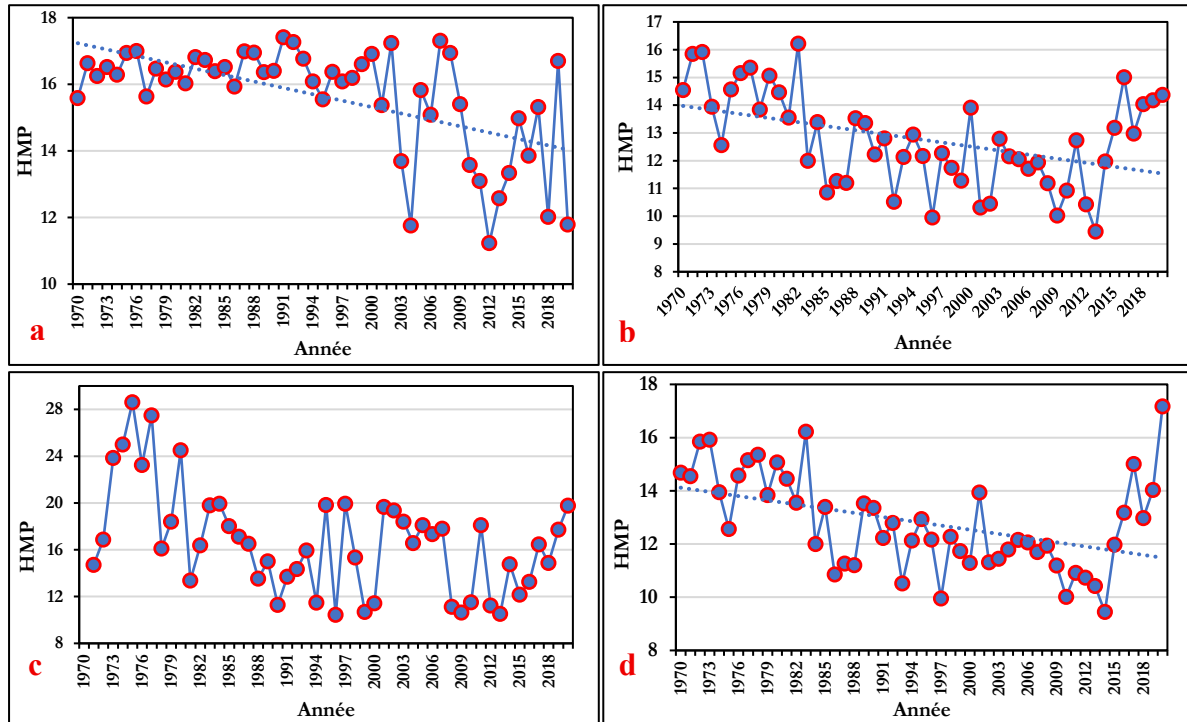


Figure 29 : Évolution des hauteurs journalières de précipitation à la station de Borotou-Koro (a) ; Odienné (b) ; Touba (c) et Beyla (d) au cours de la période 1970-2020.

6.1.7. Séquences sèches saisonnières (SS)

L'évolution des séquences sèches sur la période 1970-2020 est présentée à la figure 30 et au tableau XVII. Les séquences sèches présentent des évolutions différentes pour les stations du bassin versant. L'ensemble des stations donne une moyenne de 6 jours secs consécutifs. En effet, les stations de Borotou-Koro (Figure 30a) et de Touba (Figure 30c) affichent les sécheresses les plus longues au cours des saisons de pluie. On constate que les séquences sèches varient entre 3 et 9 jours à Borotou-Koro et entre 4 et 9 jours à Touba avec des tendances à la hausse. Deux périodes sont remarquables pour chacune des stations. La première période part de 1970 à 2000 à la station de Borotou-Koro où la moyenne des séquences sèches est de 4 jours. La deuxième période de 2001 à 2020 connaît une hausse des jours secs qui atteint 6 jours. À la station de Touba (Figure 30c), sur la période 1970-1995, les séquences sèches sont en moyenne de 5 jours comparativement à la seconde période (1996-2020) où elles augmentent jusqu'à 8

jours. Sur les stations d'Odienné (Figure 30b) et de Beyla (Figure 30d), on enregistre une moyenne de jours secs de 6 jours sur la période 1970-2020. L'évolution des séquences sèches reste globalement identique pour l'ensemble des deux stations. On remarque ainsi que sur la période d'étude, les amplitudes de jours secs restent concentrées majoritairement entre 5 et 7 jours, sauf en 1986 et 1991 où elles atteignent 4 jours et 9 jours aux stations d'Odienné et de Touba.

Tableau XVII : Tableau récapitulatif de la variation des séquences sèches saisonnières aux stations climatiques étudiées sur le bassin versant

| Stations climatiques | Séquence sèche saisonnière (mm) | | Séquence sèche moyenne | Ecart entre les séquences sèches minimales et maximales |
|----------------------|---------------------------------|----------|------------------------|---|
| | Minimale | Maximale | | |
| Borotou-Koro | 3 | 9 | 6 | 6 |
| Odienné | 4 | 8 | 6 | 4 |
| Touba | 4 | 9 | 7 | 5 |
| Beyla | 3 | 8 | 6 | 5 |

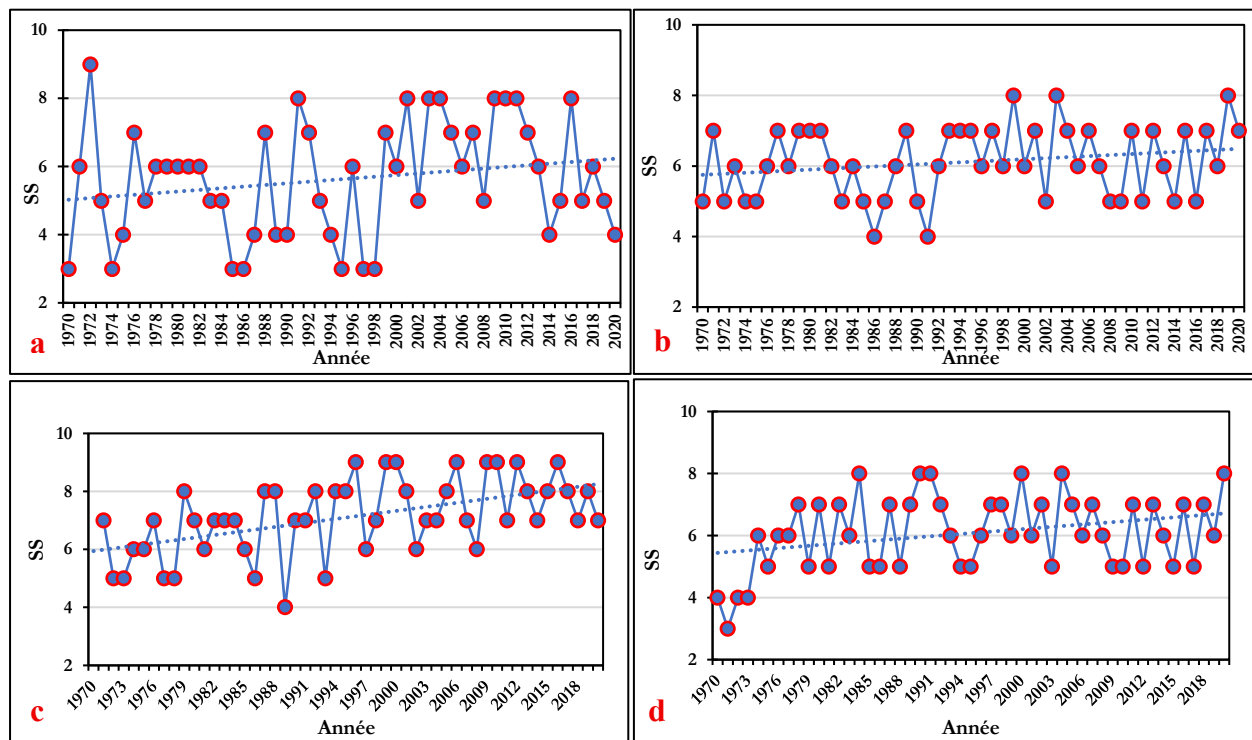


Figure 30 : Évolution des séquences sèches saisonnières à la station de Borotou-Koro (a) ; Odienné (b) ; Touba (c) et Beyla (d) au cours de la période 1970-2020.

6.2. Impact des paramètres agroclimatiques sur la culture de canne à sucre dans le bassin versant

6.2.1. Comparaison entre la pluviométrie et rendement de canne à sucre

Les valeurs moyennes de la pluviométrie intra-saisonnière et les rendements de canne à sucre pour la période 2005-2020 sont présentés à la figure 31. On constate que les hauteurs de pluie évoluent dans le même sens que les rendements sur la période 2005-2012. La pluie atteint plus de 1400 mm et le rendement maximum se chiffre à 65 t/ha. Cela traduit une corrélation parfaite entre les pluies et les rendements. Quand on considère la période 2012-2020, les hauteurs de pluies enregistrées sont insuffisantes pour combler les besoins hydriques de la canne à sucre, puisque les totaux pluviométriques saisonniers sont inférieurs à 1200 mm. Par contre, malgré les hauteurs de pluie supérieures aux besoins hydriques de la canne, les rendements ont connu une baisse assez considérable de 2013 à 2020. Il a été constaté qu'au-delà des pluies, la longueur de la saison (en moyenne 150 jours) et les séquences sèches (7 jours en moyenne) occasionnent des chutes de rendement. Cette instabilité intra-saisonnière perturbe la production de canne à sucre pendant les campagnes de 2013 à 2016. La hausse des rendements à la campagne 2012 - 2013 malgré les conditions agroclimatiques de plus en plus détériorées peut s'expliquer par l'amélioration des pratiques agricoles.

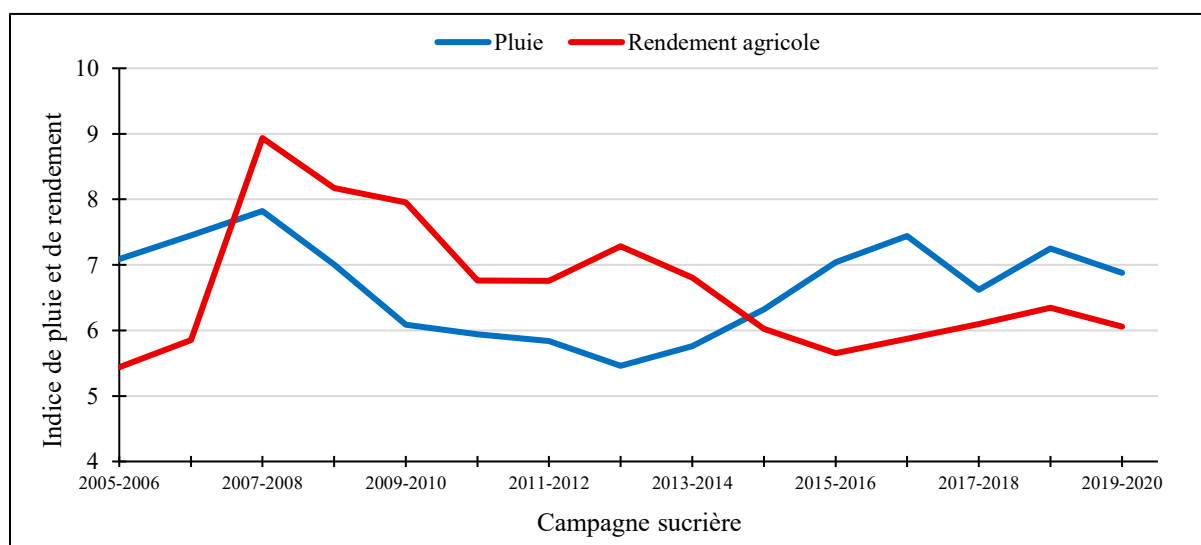


Figure 31 : Évolution comparée de la pluviométrie et des rendements de canne à sucre par campagne agricole sur la période 2005-2020.

6.2.2. Analyse de la corrélation entre les paramètres agroclimatiques et les paramètres agricoles

Les coefficients de corrélation entre les paramètres agroclimatiques et les paramètres de production de la canne à sucre sont présentés pour la période 2005-2020. Les matrices indiquent une diversité et une complexité de corrélation entre les paramètres de pluie et les données

agronomiques. Les paramètres agronomiques retenus sont les dates de planting des boutures et les productions en fin de cycle cultural. La significativité des coefficients de corrélation et leurs tendances négatives entre la pluviométrie et la production, dévoilent que la coïncidence entre les pluies et les productions de canne à sucre n'est pas universelle. Sur la période 2005-2020, un lien fort positif est constaté entre les dates de planting de canne à sucre et les variables agroclimatiques que sont les débuts de saison de pluie (DSP) et les fins des saisons de pluie (FSP).

❖ **Au premier trimestre de l'année**

Durant le premier trimestre de l'année (Figure 32), les paramètres climatiques tels que la longueur de la saison des pluies (LSP), le nombre de jour de pluie (NJP) et le cumul pluviométrique saisonnier (CSP) sont corrélés positivement avec des tendances significatives et très significatives à la production. Les coefficients de corrélation enregistrés varient entre 0,13 et 0,15. Une corrélation très significative et positive (0,68) est observée entre les dates de planting des boutures et les séquences sèches.

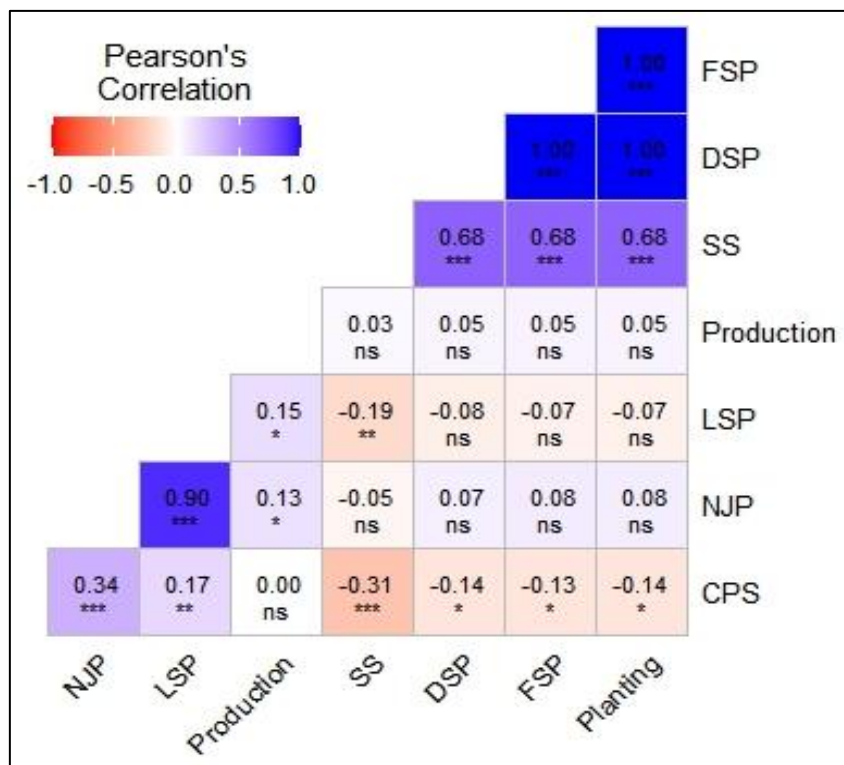


Figure 32 : Corrélation entre variables agroclimatiques et valeurs agronomiques de la canne à sucre au premier trimestre de l'année.

❖ **Au deuxième trimestre de l'année**

Au deuxième trimestre de l'année (Figure 33), des corrélations négatives significatives voire très significatives sont enregistrées entre la production de canne à sucre et les paramètres agroclimatiques que sont le début de la saison des pluies (DSP), la fin de la saison des pluies

(FSP) et les séquences sèches (SS). Les valeurs de corrélation sont comprises entre -0,37 et -0,29. Par ailleurs, il s'observe une corrélation positive non significative entre la même production et la longueur de la saison des pluies (LSP), le nombre de jour de pluie (NJP) et le cumul pluviométrique saisonnier (CSP). Ce constat traduit une bonne récolte des cannes à sucre plantées à cette période. En effet, les boutures nouvellement mises en terre, bénéficient de tous les apports d'eau saisonniers nécessaires au développement harmonieux des plantes.

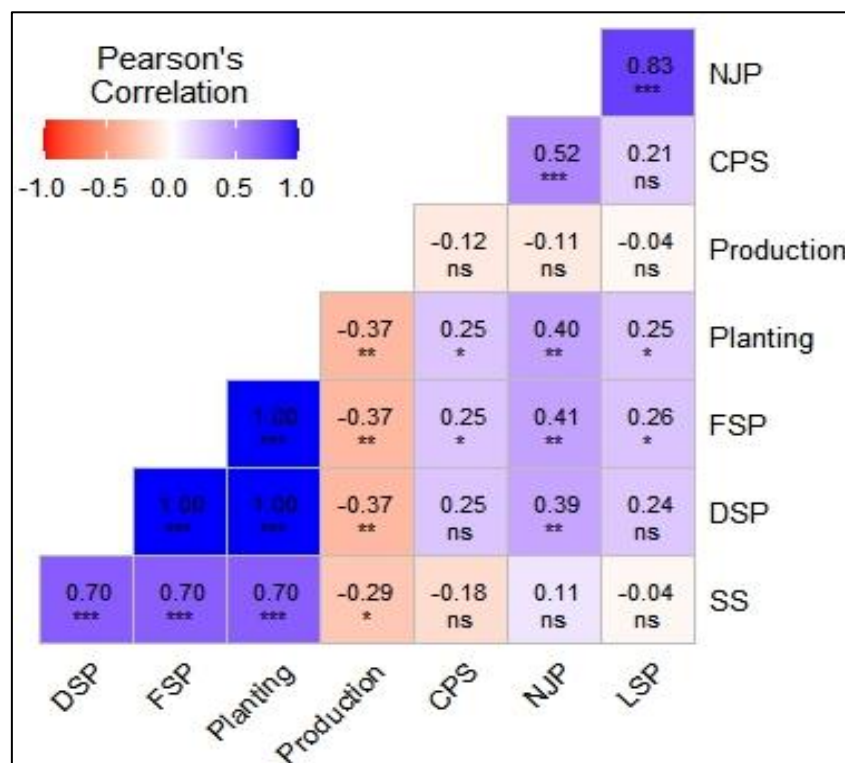


Figure 33: Corrélation entre variables agroclimatiques et valeurs agronomiques de la canne à sucre au deuxième trimestre de l'année.

❖ **Au troisième trimestre de l'année**

Le troisième trimestre (Figure 34) correspondant à la grande saison des pluies, les corrélations négatives sont plus visibles entre les dates de planting des boutures et les variables agroclimatiques. La période étant défavorable à la mise en terre des boutures, des corrélations négatives très significatives et très très significatives sont observées dans les matrices de corrélation. Les paramètres agroclimatiques tels que la longueur de la saison des pluies (LSP), le nombre de jour de pluie (NJP), les séquences sèches (SS) et le cumul pluviométrique saisonnier (CSP) évoluent inversement avec les dates de planting. Cette influence des variables climatiques en cette période ne prédit pas forcément de mauvaises productions. Selon le calendrier cultural, cette période est défavorable à la mise en terre des boutures, mais les séquences sèches (SS) de plus en plus longues au cours des saisons des pluies contraignent les agronomes à cette activité.

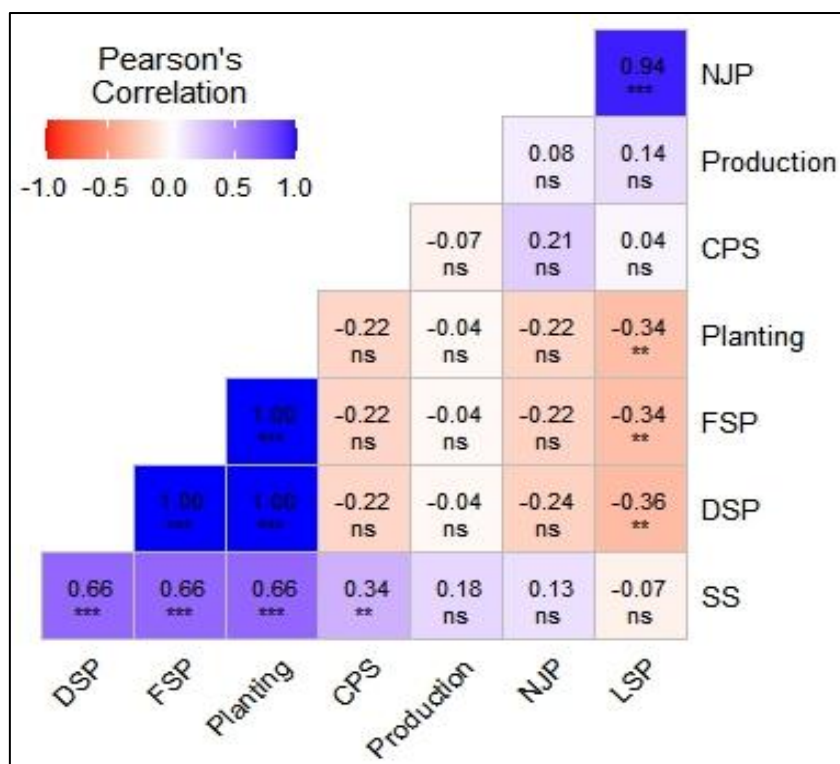


Figure 34: Corrélation entre variables agroclimatiques et valeurs agronomiques de la canne à sucre au troisième trimestre de l'année

❖ **Au quatrième trimestre de l'année**

Le quatrième trimestre de l'année est pratiquement l'inverse du précédent (Figure 35). La production est bien corrélée positivement aux variables climatiques hormis les séquences sèches (SS) qui ont des tendances très significatives. Les valeurs de la matrice de corrélation se situent entre 0,15 et 0,26. Les séquences sèches évoluent de façon opposée (-0,82) avec la production de la canne à sucre. Les dates de planting ont une corrélation négative et une tendance très significative avec la longueur de la saison des pluies (LSP). L'ensemble des corrélations observées dans ce trimestre prévoient une bonne récolte si l'itinéraire technique de la canne à sucre est bien suivi. Cette observation peut être rendue possible par l'amélioration des pratiques agricoles avec l'utilisation des engrais et des pesticides.

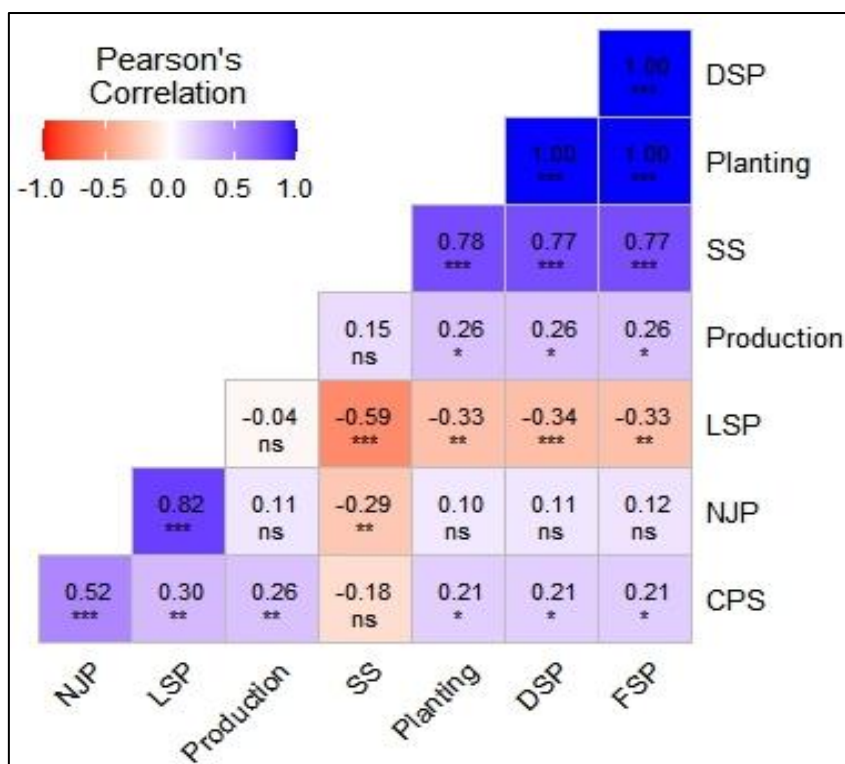


Figure 35: Corrélation entre variables agroclimatiques et valeurs agronomiques de la canne à sucre au quatrième trimestre de l'année

L'analyse des matrices, des coefficients de corrélation, montre que la production de canne à sucre n'est pas influencée par tous les paramètres agroclimatiques en même temps. Cette influence des paramètres est fonction du mois de mise en terre des boutures. Toutefois, certains paramètres ont des influences quel que soit la période de plantation. Il s'agit du cumul pluviométrique saisonnier (CSP) et du nombre de jour de pluie (NJP).

6.3. Analyse des tendances des paramètres agroclimatiques

6.3.1. Test de Mann-Kendall appliqué aux paramètres agroclimatiques

Les résultats des tests de tendance sont résumés dans le tableau XVIII. Ces tests montrent que les variables agroclimatiques étudiées sur les stations pluviométriques du bassin versant de 1970 à 2020 présentent des tendances. D'après le test de Mann-Kendall à la station de Borotou-Koro, il est évident que les fins de saison de pluie et les hauteurs journalières moyennes des précipitations présentent des tendances significatives. Sur la période d'étude, une tendance à la hausse est observée dans les fins de saisons de pluie ce qui traduit un recul des dates de fins de saison. Par contre, les hauteurs journalières de précipitation affichent une tendance à la baisse des pluies journalières décrivant ainsi la réduction de la pluie à cette station du bassin versant. À la station d'Odienné, une absence de tendance significative est observée au niveau de la chronique de toutes les variables, hormis les hauteurs journalières de pluie. A cette station

comme à Borotou Koro, les hauteurs de pluie journalière saisonnière ont connu une tendance à la baisse des intensités traduisant ainsi la disparité des pluies dans ces zones. A la station de Touba, le test de Mann-Kendall montre une tendance à la hausse des séquences sèches de façon significative comparativement autres stations, les hauteurs journalières de pluie restent toujours en baisse avec des tendances significatives. De toutes les stations, Beyla est la plus affectée par les fluctuations climatiques. En effet, dans sa chronique de variable agroclimatique, trois variables dont le nombre de jour de pluie, le cumul pluviométrique saisonnier et les hauteurs journalières de pluie affichent des tendances significatives toutes à la baisse. Ce constat démontre que dans cette zone du bassin versant le climat connaît une instabilité.

Tableau XVIII : Récapitulatif des tendances des paramètres agroclimatiques

| Descripteurs | Descripteurs intra saisonniers | | | | | | |
|------------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | DSP | FSP | LSP | NJP | CPS | HMP | SS |
| Borotou Koro | | | | | | | |
| Tendance | N | O | N | N | N | O | N |
| Sens tendance | - | Hausse | - | - | - | Baisse | - |
| t de Kendall | 0,182 | 0,262 | 0,033 | -0,027 | 0,049 | -0,329 | 0,141 |
| Statistique (S) | 230 | 329 | 42 | -34 | 63 | -419 | 166 |
| p-value | 0,063 | 0,008 | 0,739 | 0,788 | 0,615 | 0,0007 | 0,173 |
| Pente (Z) | 1,861 | 2,669 | 0,333 | -0,268 | 0,504 | -3,395 | 1,362 |
| Odienné | | | | | | | |
| Tendance | N | N | N | N | N | O | N |
| Sens tendance | - | - | - | - | - | Baisse | - |
| t de Kendall | -0,032 | -0,098 | -0,098 | -0,070 | -0,175 | -0,300 | 0,156 |
| Statistique (S) | -40 | -123 | -123 | -88 | -223 | -383 | 170 |
| p-value | 0,751 | 0,321 | 0,321 | 0,479 | 0,071 | 0,001 | 0,150 |
| Pente (Z) | -0,317 | -0,993 | -0,993 | -0,707 | -1,803 | -3,103 | 1,439 |
| Touba | | | | | | | |
| Tendance | N | N | N | N | N | O | O |
| Sens tendance | - | - | - | - | - | Baisse | Hausse |
| t de Kendall | -0,084 | 0,021 | -0,002 | -0,002 | 0,045 | -0,247 | 0,371 |
| Statistique (S) | -106 | 26 | -3 | -3 | 57 | -315 | 421 |
| p-value | 0,393 | 0,839 | 0,987 | 0,987 | 0,649 | 0,011 | 0,0004 |
| Pente (Z) | -0,854 | 0,204 | -0,016 | -0,016 | 0,455 | -2,550 | 3,522 |
| Beyla | | | | | | | |
| Tendance | N | N | N | O | O | O | N |
| Sens tendance | - | - | - | Baisse | Baisse | Baisse | - |
| t de Kendall | -0,046 | -0,135 | -0,036 | -0,224 | -0,269 | -0,358 | 0,207 |
| Statistique (S) | -58 | -170 | -45 | -284 | -343 | -457 | 233 |
| p-value | 0,643 | 0,169 | 0,721 | 0,021 | 0,005 | 0,0002 | 0,051 |
| Pente (Z) | -0,463 | -1,375 | -0,358 | -2,300 | -2,778 | -3,704 | 1,949 |

DSP : Début de la saison des pluies ; **FSP** : Fin de la saison des pluies ; **LSP** : Longueur de saison des pluies ; **NJP** : Nombre de jour de pluie ; **CPS** : Cumul pluviométrique saisonnier ; **HMP** : Hauteur journalière moyenne de précipitation ; **SS** : Séquences sèche ; **N** : Non ; **O** : Oui.

6.3.2. Test de Mann-Kendall séquentiel appliqué aux paramètres agroclimatiques

Le test séquentiel de Mann-Kendall appliqué aux variables agroclimatiques indique une tendance pour toutes les stations étudiées sur le bassin versant. Seules les tendances significatives indiquées par le test de Mann-Kendall sont présentées à la figure 36. A la station de Borotou-Koro (Figure 36A), la tendance à la hausse au niveau des fins de saisons de pluie débute en 1986 et devient significative à 95 % au début des années 1990. Par contre, pour la variable des hauteurs de pluie journalières, la tendance débute en 2009 (Figure 36B) avec une régression continue. La même variable à la figure 36C, montre le début de la tendance significativement négative à la station d'Odienné à partir de 1980. L'évolution tendancielle des variables agroclimatiques affectant les hauteurs de pluie journalière et les séquences sèches à la station de Touba débute respectivement en 1986 (Figure 36D) et 2005 (Figure 36E).

Enfin à la station de Beyla, les tendances détectées par le test de Mann-Kendall ont débuté en 1986 pour le nombre de jour de pluie (Figure 36G). Concernant la variable le cumul pluviométrique saisonnier, la tendance à la baisse commence deux années après celle du nombre de jour de pluie c'est-à-dire en 1988 (Figure 36H). Quant aux hauteurs de pluie journalière, la tendance à la baisse a été constatée en 1982 pour connaître une significativité à partir de 1984 sur toutes les stations.

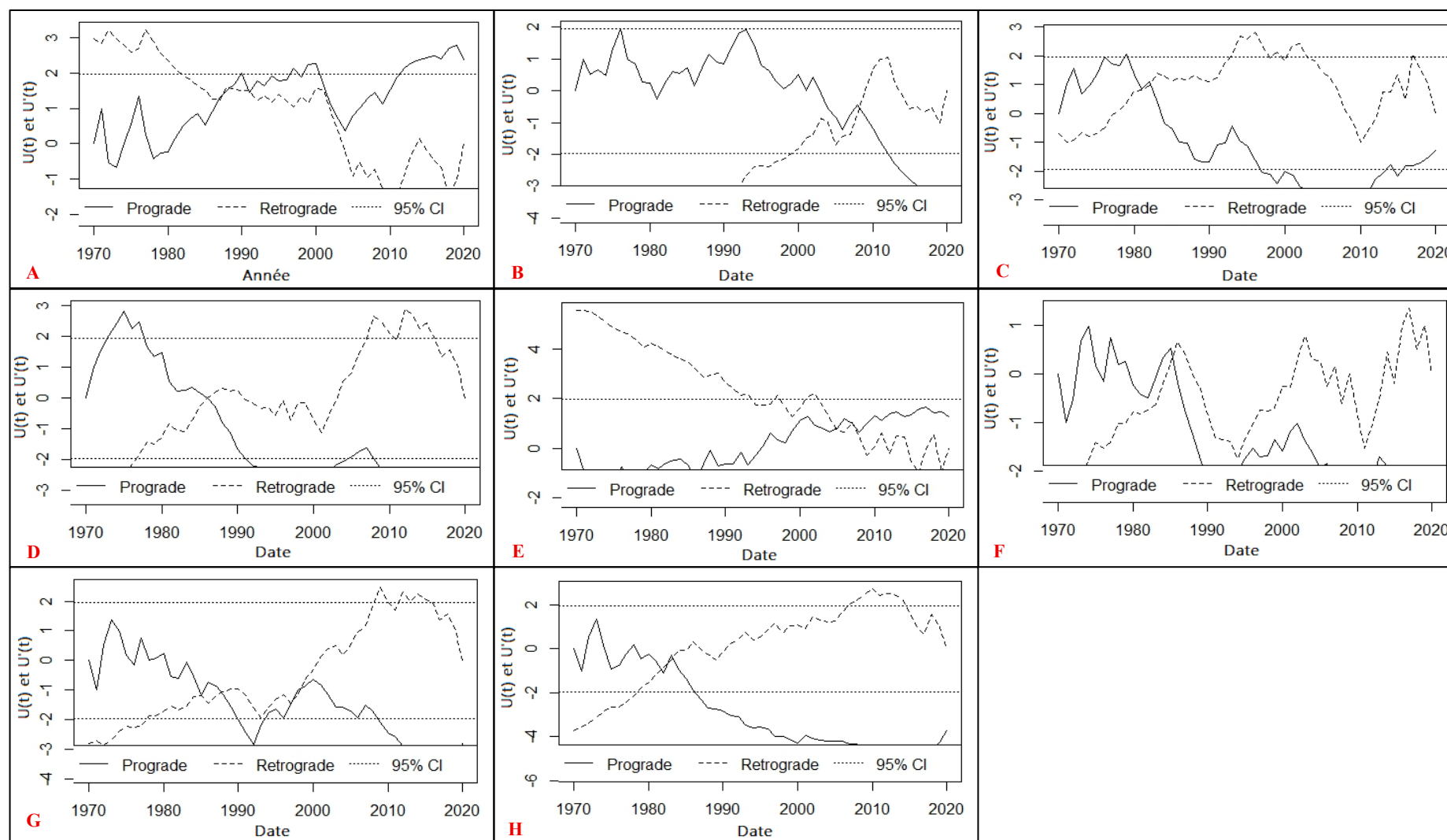


Figure 36 : Date des ruptures dans les chroniques agroclimatiques des stations étudiées dans le bassin versant

6.4. Détermination du calendrier cultural et adaptation de la culture de canne à sucre dans le bassin versant

6.4.1. Calendrier cultural dans le bassin versant selon les données climatiques

La figure 37 présente le calendrier cultural dans le bassin versant. La courbe de détermination des saisons agricoles met en évidence les événements climatiques significatifs (A1, A2, B1, B2, D et C) par l'intersection des trois courbes (ETP, ETP/2 et ETP/10) avec la courbe de la pluviométrie. En effet, les événements A1 à C délimitent la saison sèche agricole qui s'étend de fin janvier à décembre, tandis que la saison humide agricole est définie par les événements A2 à D et se déroule de mi-mars à début octobre. Ces deux saisons agricoles comprennent trois phases végétatives : pré-humide, humide et post-humide. La phase pré-humide (A2 à B1) commence durant la troisième décennie de mars et se termine au cours de la première décennie de mai. Durant cette période prolongée, les parcelles demeurent légèrement humides en raison de l'irrégularité et du manque de précipitations ($P < ETP$). La phase humide (B1 à B2) débute en mai (première décennie), lorsque le flétrissement commence à diminuer, et se conclut en octobre (troisième décennie). Cette brève période humide est caractérisée par des précipitations suffisantes ($P > ETP$) pour assurer l'humidité des sols. Néanmoins, une déshydratation des sols survient durant la phase post-humide (B2 D), car la courbe des précipitations montre une forte diminution ($P < ETP$). Cette phase s'étend de la deuxième décennie d'octobre jusqu'à la première décennie de novembre et signale un recul des pluies avant d'entrer dans une longue période sèche (D à C) qui commence en novembre et se prolonge jusqu'en mars. Ainsi, les positions respectives des courbes illustrent la variabilité annuelle des précipitations ainsi que celle des périodes végétatives.

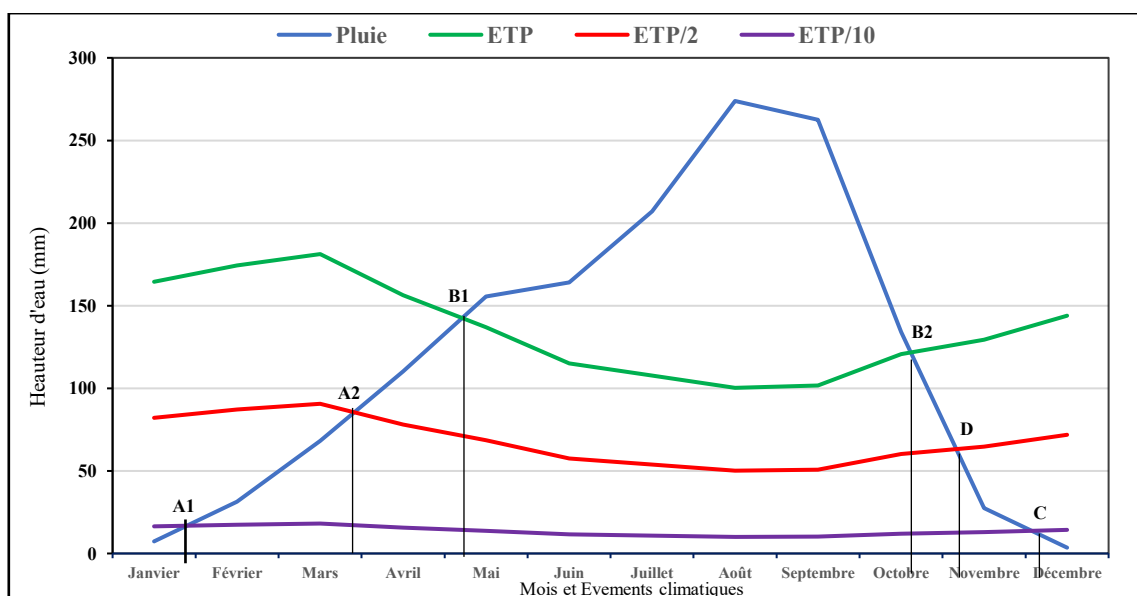


Figure 37 : Calendrier cultural selon les données climatiques dans le bassin versant

6.4.2. Adaptation de la culture de canne à sucre au calendrier cultural

La figure 38 présente le calendrier cultural adapté à la culture de canne à sucre. En effet, la saison sèche correspond à la période de l'année où la pluviométrie est inférieure à la moitié de l'Evapotranspiration Potentielle ($P < ETP/2$). Elle couvre la 1^{ère} décade du mois de janvier à la 3^{ème} décade du mois d'avril (A_1-A_2). Il s'agit de la période où la croissance végétative est fortement ralentie. Cette période correspond à la première étape du cycle végétatif de la canne à sucre. Pendant cette période, la mise en terre des boutures de canne s'adapte parfaitement. En effet, les réserves d'eau contenues dans le sol ont la possibilité de maintenir les boutures humides et de favoriser la germination des premiers bourgeons. La période pré-humide (A_2-B_1) correspond à la période de l'année où la pluviométrie est comprise entre $ETP/2 < P < ETP$. Selon le calendrier cultural, elle s'étend de la première décade du mois d'avril à la mi-mai. Il s'agit de la période du développement des premiers bourgeons en talle sans aléas. A ce stade d'évolution de la canne, la plante est moins exigeante en eau et un retour à l'évènement A_2 aurait moins d'impact sur la croissance. La période pré-humide est la période du démarrage de la croissance végétative de la canne à sucre. La période humide (B_1-B_2) correspond à la période de l'année où la pluviométrie est supérieure à l'Evapotranspiration Potentielle ($P > ETP$). Elle s'étend de la première décade du mois de mai à la troisième décade du mois de septembre. C'est la période de croissance active de la canne qui coïncide avec sa période d'exigence hydrique maximale pour la satisfaction au mieux de ses besoins hydriques. En cette période de développement, la canne à sucre est à son stade d'élongation et de floraison pour atteindre sa taille maximale. Le moindre stress hydrique conduit à la baisse de production. La période post-humide (B_2-D) est la période de l'année postérieure à la période humide et comprise entre ETP et $ETP/2$. Elle s'étend du mois d'octobre à la première décade du mois de novembre. C'est la période au cours de laquelle les cannes sont généralement à l'étape de maturation où elles perdent la majorité de leurs pailles pour accumuler le maximum de sucre. La période sèche ($D-C$), est la période pendant laquelle les plantes de canne à sucre commencent à épuiser la réserve en eau dans le sol. Elle ne dure qu'au plus 20 jours. C'est le moment idéal de la récolte et du transport sur le lieu de transformation.

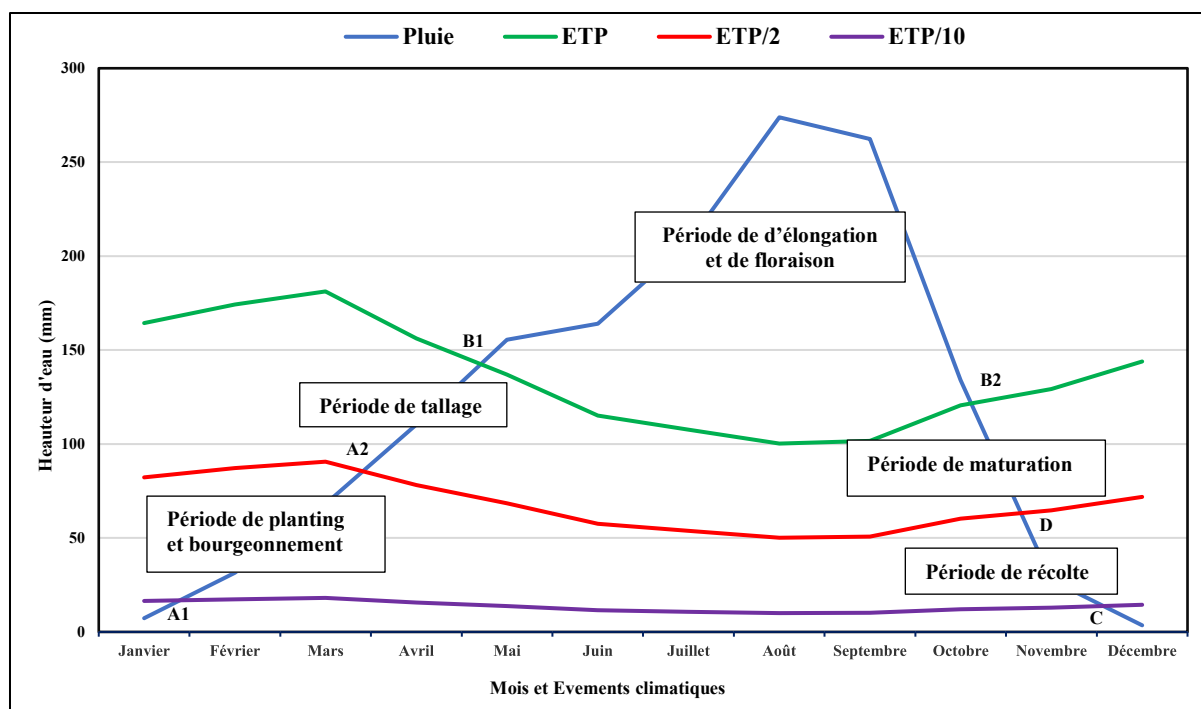


Figure 38 : Calendrier cultural adapté de la culture de canne à sucre dans le bassin versant

6.5. Analyse des tendances pluviométriques dans le bassin versant

6.5.1. Variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie dans le bassin versant

La figure 39 présente l'évolution des isohyètes dans le bassin versant. L'analyse de la figure se fera par le suivi de l'isohyète 1400 mm. Le suivi de cette isohyète indique qu'au cours de la période 1970-1979, le bassin versant a connu une bonne pluviométrie. Les parties Ouest et Nord ont enregistré des hauteurs de pluie importantes avec la présence de l'isohyète 1850 mm autour de la station de Beyla et celle de 1550 mm à proximité de la station d'Odienné. Seule la partie Est a connu une pluviométrie annuelle moyenne de 1200 mm.

Sur la période 1980-1989, on remarque une baisse significative des hauteurs de pluie d'environ 50% sur l'ensemble des stations de la zone d'étude. Cela se traduit par le déplacement ou le glissement de l'isohyète 1400 mm vers l'Ouest et la disparition de l'isohyète 1850 mm. Le déficit pluviométrique de cette décennie s'est fait ressentir au Nord et à l'Ouest de la zone d'étude, alors que le Sud n'a pas été affecté. La décennie 1980-1989 a connu les manifestations de la grande rupture pluviométrique survenue en Afrique de l'Ouest autour des années 1970. Cette période renferme les premiers événements de sécheresse dans la zone d'étude, avec l'apparition des classes de sécheresse de longue durée surtout au Nord du bassin versant avec une moyenne pluviométrique annuelle par moment en-dessous de 1000 mm.

Au cours de la décennie 1990-1999, la pluviométrie a connu une hausse par rapport à la décennie précédente (1980-1989) avec un recul de l'isohyète 1400 mm vers l'Est du bassin

versant. Les pluies annuelles moyennes dans le bassin versant se situent entre 1240 mm et 1720 mm, et sont réparties de manière hétérogène dans la majeure partie. La partie Est du bassin versant reste toujours moins arrosée comparativement à la décennie 1970-1979, même si les hauteurs de pluie sont relativement élevées. Par contre, l'Ouest du bassin versant connaît les hauteurs pluviométriques les plus importantes. On constate une modification de la zone des faibles hauteurs de pluie, par la migration de la zone Sud-Est vers le Nord. Comparativement à la décennie 1970-1979, le bassin versant a connu une baisse des hauteurs de pluies, surtout dans sa partie Ouest sur la période 1980-1989.

À la décennie 2000-2009, on remarque une baisse de la pluie avec un déplacement de l'isohyète 1400 mm vers l'Ouest du bassin versant. Ce retour pluviométrique se manifeste par une avancée de l'isohyète 1400 mm et par l'apparition de l'isohyète 1640 mm. Le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la pluviométrie de 2000 à 2009 permet de constater une variation à symétrie opposée dans le bassin versant. D'une part, on observe une généralisation et une intensification de la baisse pluviométrique amorcée à la décennie 1980-1989. Cette baisse affecte la partie Centre jusqu'à l'Est du bassin versant. Ce qui se manifeste par la disparition et la disparité de certaines isohyètes. Ainsi, l'isohyète 1440 mm à la décennie précédente fait place à l'isohyète 1400 mm et un écartement significatif entre les isohyètes 1300 mm et 1350 mm. D'autre part, la zone allant de l'Ouest au Centre connaît une hausse pluviométrique avec l'apparition de l'isohyète 1650 mm à la station de Beyla. Cette augmentation des hauteurs pluviométriques est évaluée à environ 100 mm par rapport à la décennie précédente.

La décennie 2010-2019 présente une abondance de la pluviométrie sur l'ensemble du bassin versant. Cette abondance se traduit par le recul très prononcé de l'isohyète 1400 mm dans l'Est du bassin versant. Dans l'Ouest du bassin versant autour de la station de Beyla, l'isohyète 1650 mm fait place à l'isohyète 1900 mm. A la station de Touba au Sud et d'Odienné au Nord du bassin versant, les pluies passent respectivement de 1200 mm à 1550 mm et de 1350 mm à 1450 mm. Le retour de la pluviométrie amorcé de décennie 1990-1999 s'est poursuivi jusqu'à la décennie 2010-2019.

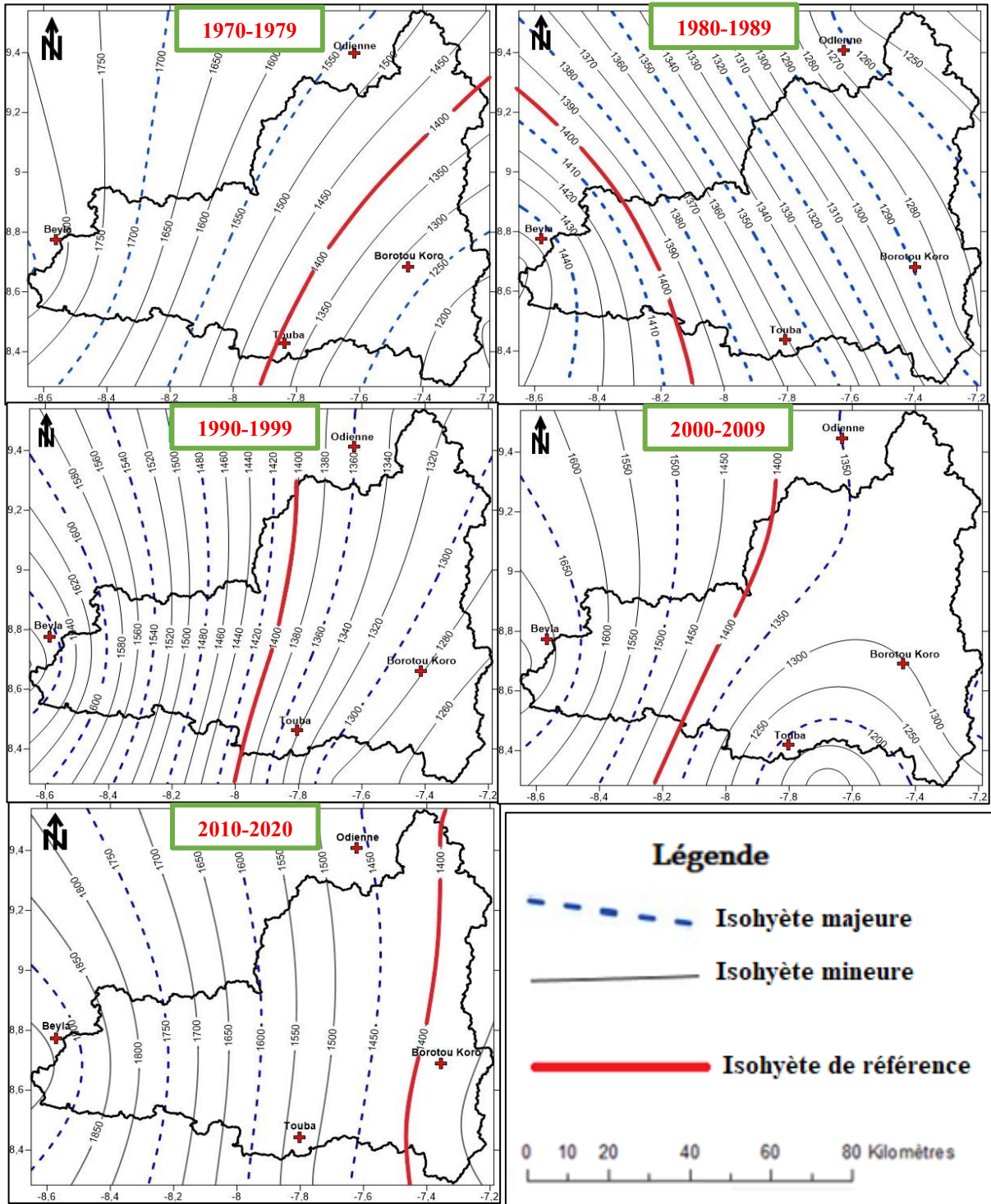


Figure 39 : Évolution des isohyètes dans le bassin versant par décennie de 1970 à 2020

6.5.2. Variation des indices standardisés de précipitation et d'évapotranspiration (SPEI)

La figure 40 présente l'évolution des SPEI dans le bassin versant sur la période 1970-2020. Une représentation des périodes excédentaires et déficitaires en fonction des stations permet de constater que les périodes excédentaires sont concentrées à la station d'Odienné (Figure 40b) et à la station de Beyla (Figure 40d) à la décennie 1970-1980. Sur cette même période, une alternance d'années excédentaires et déficitaires est observée à la station de Borotou-Koro (Figure 40a) et à la station de Touba (Figure 40c). Quelques zones ponctuelles sèches sont concentrées en début de décennie à la station de Touba (Figure 40c) et en fin de décennie pour la station de Borotou-Koro (Figure 40a). Après la décennie humide qui a affecté tout le bassin versant, la station de Beyla (Figure 40d) a connu une longue période sèche (1981-1993) avec un difficile retour à la normale qui s'étend de 1994 à 2008. On constate par la suite que la période de 2009 à 2017 a été marquée par une période humide avec des indices d'humidité atteignant 2,1. La décennie humide à la station de Borotou-Koro, a été précédée d'une longue sécheresse météorologique sur la partie Est de la zone d'étude. Cette période sèche qui part de 1981 à 2001, est caractérisée par des années très sèches ($\text{SPEI} < -1$). La même sécheresse s'est étendue jusqu'à la partie Nord du bassin versant avec une interruption de période humide de 1992 à 2000 à la station d'Odienné (Figure 40b). De toutes les stations du bassin versant, seule la station de Touba (Figure 40c) a été épargnée de cette sécheresse, connaissant ainsi une période normale avec par moment des périodes isolement sèches. L'évolution des SPEI montre que la décennie 1980-1990 a été déficitaire sur l'ensemble du bassin versant. Outre cette déficience décennale, des années communes sèches sont enregistrées sur les stations d'Odienné et Beyla. À partir de 2009, des années excédentaires apparaissent de plus en plus sur toute la zone d'étude ($\text{SPEI} > 1,5$), mais elles sont par moment interrompues par des années déficitaires de moins de trois années consécutives. Ainsi, l'année hydrologique qui est caractérisée par un excédent pluviométrique, apparaît d'une station à une autre à différente année avec des amplitudes humides dépassant 1,5. Aux stations d'Odienné et de Beyla, l'année hydrologique a été enregistrée en 1997. Les stations de Borotou-Koro et de Touba ont connu leur année hydrologique respectivement en 2007 et 2013.

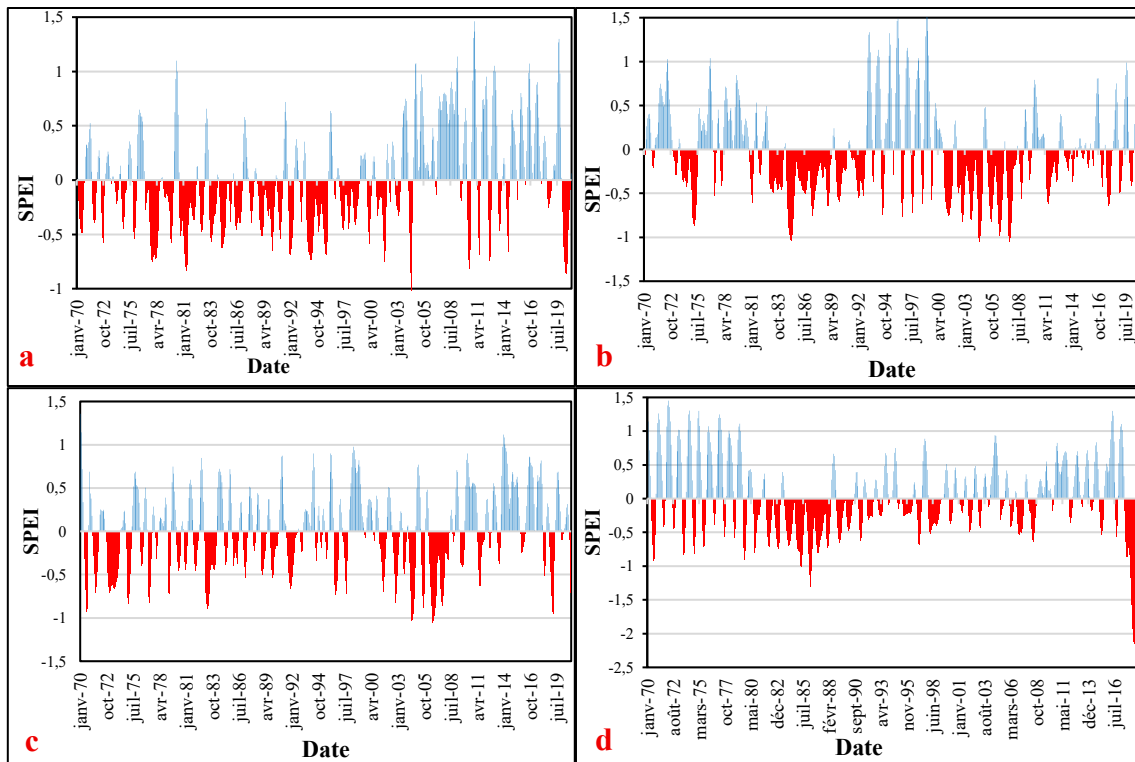


Figure 40 : Évolution des SPEI à la station de Borotou-Koro (a) ; Odienné (b) ; Touba (c) et Beyla (d) au cours de la période 1970-2020.

6.5.3. Intensité, fréquence et durée des indices standardisés de précipitation et d'évapotranspiration

Les résultats de l'estimation de l'intensité de la fréquence et de la durée de la sécheresse météorologique dans le bassin versant sont présentés dans le tableau XIX. L'analyse des résultats montre que le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona a connu une sécheresse de type modérée dans son ensemble. Mais cette sécheresse s'est manifestée différemment selon les stations étudiées. Les stations d'Odienné et de Beyla ont connu les épisodes secs les plus longs respectivement de 57 mois et 55 mois avec des fréquences de 54,2 % et 49,8 %. À Odienné, les dates d'occurrences d'août 1984 et avril 1989 sont caractérisées par des sécheresses dites modérées, avec des intensités de -1. Par contre, à la station de Beyla, les épisodes de septembre 1983 et mars 1988 sont caractérisés de sécheresse modérée avec un indice de -1,3. Aux stations de Borotou-Koro et Touba, les périodes sèches ont connu une durée moins longue que celles d'Odienné et de Beyla. En effet, la sécheresse la plus longue à Borotou-Koro a duré 29 mois et à Touba 27 mois avec des fréquences respectives de 56 % et 51,8 %. Les périodes d'occurrence à Borotou-Koro sont septembre 1984 et janvier 1987 avec des indices de -1,2 qualifiés de sécheresse modérée. À la station de Touba, les périodes d'occurrence sont observées en mars 2006 et mai 2008. L'intensité caractérisant ces épisodes est de -1,05 avec une sécheresse de type modérée.

Tableau XIX: Intensité, fréquence et durée des séquences météorologiques

| Paramètres | | Indications |
|--------------------------------|-----------|-------------------------------|
| Odienné | | |
| Durée Longue Sécheresse | | 57 Mois |
| Date d'occurrence | | août 1984 – avril 1989 |
| Sécheresse | Intensité | -1,0 |
| | Classe | Modérée |
| | Fréquence | 54,24 |
| Humidité | Intensité | 1,5 |
| | Classe | Sévère |
| | Fréquence | 45,75 |
| Borotou Koro | | |
| Durée Longue Sécheresse | | 29 Mois |
| Date d'occurrence | | septembre 1984 – janvier 1987 |
| Sécheresse | Intensité | -1,2 |
| | Classe | Modérée |
| | Fréquence | 56,09 |
| Humidité | Intensité | 1,4 |
| | Classe | Sévère |
| | Fréquence | 43,91 |
| Touba | | |
| Durée Longue Sécheresse | | 27 Mois |
| Date d'occurrence | | mars 2006 - mai 2008 |
| Sécheresse | Intensité | -1,05 |
| | Classe | Modérée |
| | Fréquence | 51,83 |
| Humidité | Intensité | 1,05 |
| | Classe | Modérée |
| | Fréquence | 48,17 |
| Beyla | | |
| Durée Longue Sécheresse | | 55 Mois |
| Date d'occurrence | | septembre 1983 -mars 1988 |
| Sécheresse | Intensité | -1,3 |
| | Classe | Modérée |
| | Fréquence | 49,82 |
| Humidité | Intensité | 1,4 |
| | Classe | Modérée |
| | Fréquence | 50,17 |

6.6. Évolution des paramètres climatiques aux horizons futurs

6.6.1. Erreur moyenne annuelle des précipitations et des températures simulées par les modèles climatiques

L'évaluation des trois (3) modèles climatiques régionaux révèle des biais de précipitation et de température qui évoluent selon chaque modèle. Ainsi, les données de référence observée (1970-2005) diffèrent des données de modèles climatiques régionaux RACMO22T, RCA4 et REMO2009 au niveau des étudiées (Borotou-Koro, Odienné, Touba et Beyla). Dans le complexe sucrier de Borotou-Koro (Tableau XX), on constate que les trois modèles surestiment les quantités de pluie tombées. L'erreur relative moyenne annuelle du modèle climatique régional RACMO22T est évalué à 25 %, et 2,5 % pour le modèle RCA4. Le modèle REMO2009 surestime les données observées de 73,9%.

Quant aux températures, l'ensemble des modèles utilisés surestime les données fournies avec des taux d'erreurs qui évoluent entre 6 % et 6,2 %.

Tableau XX : Taux d'erreurs des précipitations et des températures moyennes annuelles simulées à la station de Borotou Koro

| Station | Borotou-Koro | | |
|----------------------------------|---------------------|------------|-------------|
| Modèle climatique | RACMO22T | RCA4 | REMO2009 |
| Précipitation | | | |
| Pluie observée (mm) | | 1156,1 | |
| Pluie simulée (mm) | 1445,2 | 1184,8 | 2010,3 |
| Erreur relative (%) | 25,0 | 2,5 | 73,9 |
| Température | | | |
| Température observée (°C) | | 26,2 | |
| Température simulée (°C) | 27,8 | 27,8 | 27,8 |
| Erreur relative (%) | 6,0 | 6,0 | 6,2 |

À la station d'Odienné (Tableau XXI), les précipitations moyennes annuelles sont sous-estimées par les 2 modèles climatiques régionaux que sont RACMO22T et RCA4 aux taux respectifs de -17,3 % et -12,2%. Seul le modèle REMO2009 surestime les hauteurs de pluie simulées avec un taux d'erreur de 46,8%. Comme à la station de Borotou Koro, les données de température simulées à Odienné sont surestimées par tous les modèles climatiques. Les taux d'erreur relatives aux températures sont de 6,4 % pour le modèle RACMO22T et les modèles RCA4 et REMO2009 ont des taux d'erreur respectifs de 6,6 % et 6,5 %.

Tableau XXI : Taux d'erreurs des précipitations et des températures moyennes annuelles simulées à la station d'Odienné

| Station | Odienné | | |
|----------------------------------|----------------|--------------|-------------|
| Modèle climatique | RACMO22T | RCA4 | REMO2009 |
| Précipitation | | | |
| Pluie observée (mm) | | 1294,6 | |
| Pluie simulée (mm) | 1070,4 | 1136,6 | 1900,7 |
| Erreur relative (%) | -17,3 | -12,2 | 46,8 |
| Température | | | |
| Température observée (°C) | | 26,2 | |
| Température simulée (°C) | 27,8 | 27,9 | 27,9 |
| Erreur relative (%) | 6,4 | 6,6 | 6,5 |

D'après le tableau XXII, les 2 modèles climatiques régionaux RACMO22T et RCA4 sous-estiment les précipitations à la station de Touba. Les taux d'erreurs estimés sont de -5,3 % pour le modèle climatique régional RACMO22T et -9,3 % pour le modèle climatique RCA4. Le modèle climatique REMO2009 surestime toujours les précipitations à cette station du bassin versant.

Les erreurs de simulation au niveau des températures restent toujours surestimées dans le bassin versant et sont respectivement de 5,9%, 5,8% et 11,1% pour les modèles RACMO22T, RCA4 et REMO2009.

Tableau XXII : Taux d’erreurs des précipitations et des températures moyennes annuelles simulées à la station de Touba

| Station | Touba | | |
|----------------------------------|--------------|-------------|-------------|
| Modèle climatique | RACMO22T | RCA4 | REMO2009 |
| Précipitation | | | |
| Pluie observée (mm) | | 1265,9 | |
| Pluie simulée (mm) | 1198,6 | 1147,7 | 1997,3 |
| Erreur relative (%) | -5,3 | -9,3 | 57,8 |
| Température | | | |
| Température observée (°C) | | 26,2 | |
| Température simulée (°C) | 27,8 | 27,8 | 27,8 |
| Erreur relative (%) | 5,9 | 5,8 | 11,1 |

Enfin, à la station de Beyla (Tableau XXIII), les trois modèles climatiques surestiment les pluies avec des amplitudes d’erreurs moyennes de 17,5% ; 10,6% et 11,3% respectivement pour RACMO22T, RCA4 et REMO2009. Quant aux températures, le constat général est le même à la station de Beyla. Les modèles surestiment les valeurs de températures comme présenté dans le tableau XXIII. Les erreurs relatives sont de 11% pour le modèle RACMO22T et 11,1% pour les modèles RCA4 et REMO2009.

Tableau XXIII : Taux d’erreurs des précipitations et de températures moyennes annuelles simulées à la station de Beyla

| Station | Beyla | | |
|----------------------------------|--------------|-------------|-------------|
| Modèle climatique | RACMO22T | RCA4 | REMO2009 |
| Précipitation | | | |
| Pluie observée (mm) | | 1671,8 | |
| Pluie simulée (mm) | 1965,1 | 1848,8 | 1860,8 |
| Erreur relative (%) | 17,5 | 10,6 | 11,3 |
| Température | | | |
| Température observée (°C) | | 25,0 | |
| Température simulée (°C) | 27,8 | 27,8 | 27,8 |
| Erreur relative (%) | 11,0 | 11,1 | 11,1 |

6.6.2. Correction des biais et fiabilité des sorties des modèles climatiques

Les données pluviométriques observées et simulées par les trois modèles climatiques régionaux (MCRs) aux stations de Borotou-Koro, Odienné, Touba et Beyla montrent qu’il existe des écarts significatifs entre les données observées et simulées. Les données non corrigées montrent chacun des écarts clairs dans la façon dont ils reproduisent les précipitations sur la période de référence (Figure 41). Ces biais sont beaucoup plus importants au cœur de la saison pluvieuse.

Mais des écarts importants ont été également observés durant la saison sèche. Cependant, après correction des biais, les données sont améliorées. Par conséquent, les MCR corrigés peuvent être considérés comme fiables.

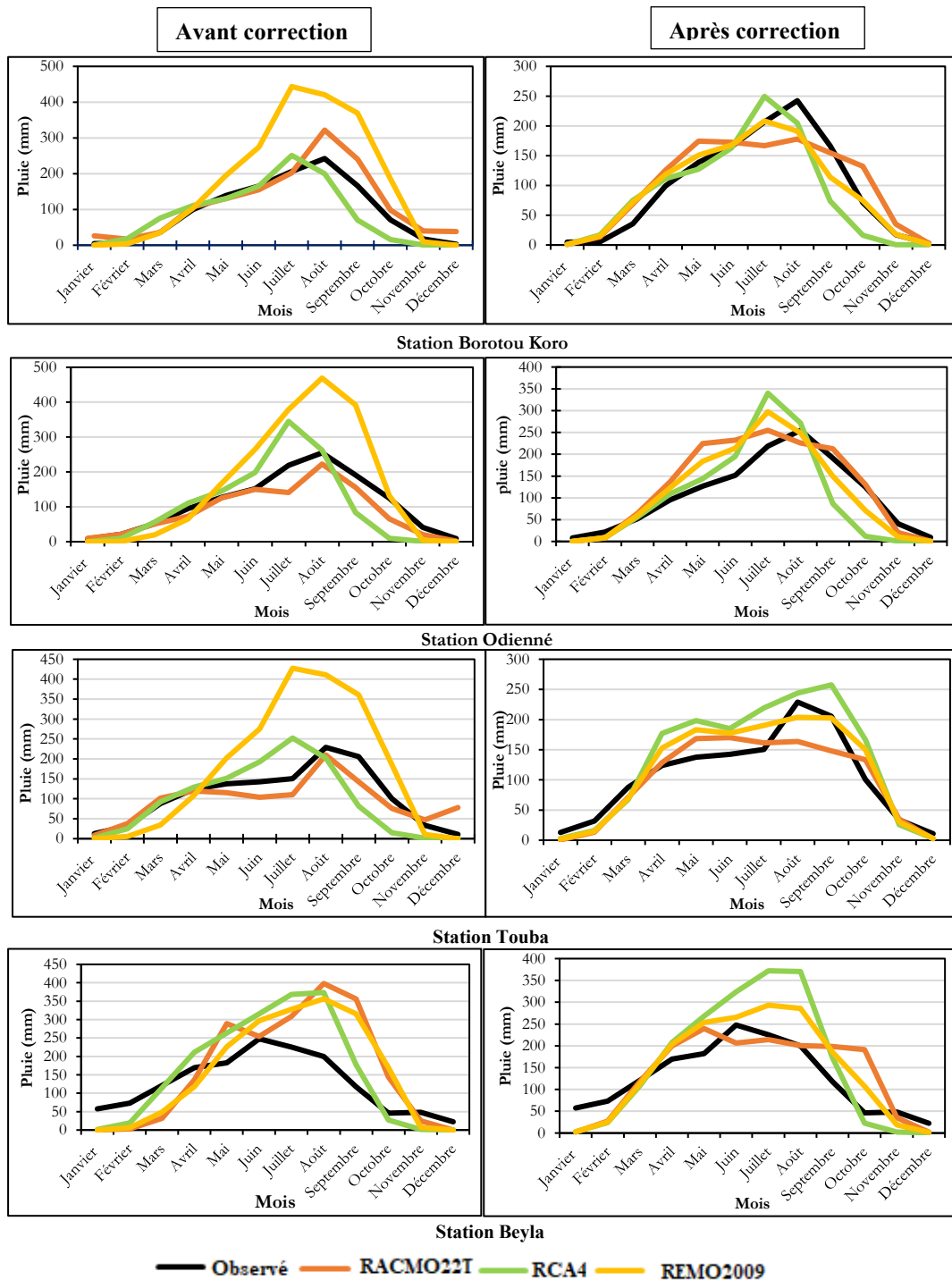


Figure 41 : Évolution des pluies avant et après la correction des biais aux stations du bassin versant sur la période 1970-2005.

Après la correction des biais, on peut observer que sur la période de référence (1970-2005), la distribution des données de température simulées et corrigées est presque similaire à celle des observations (Figure 42).

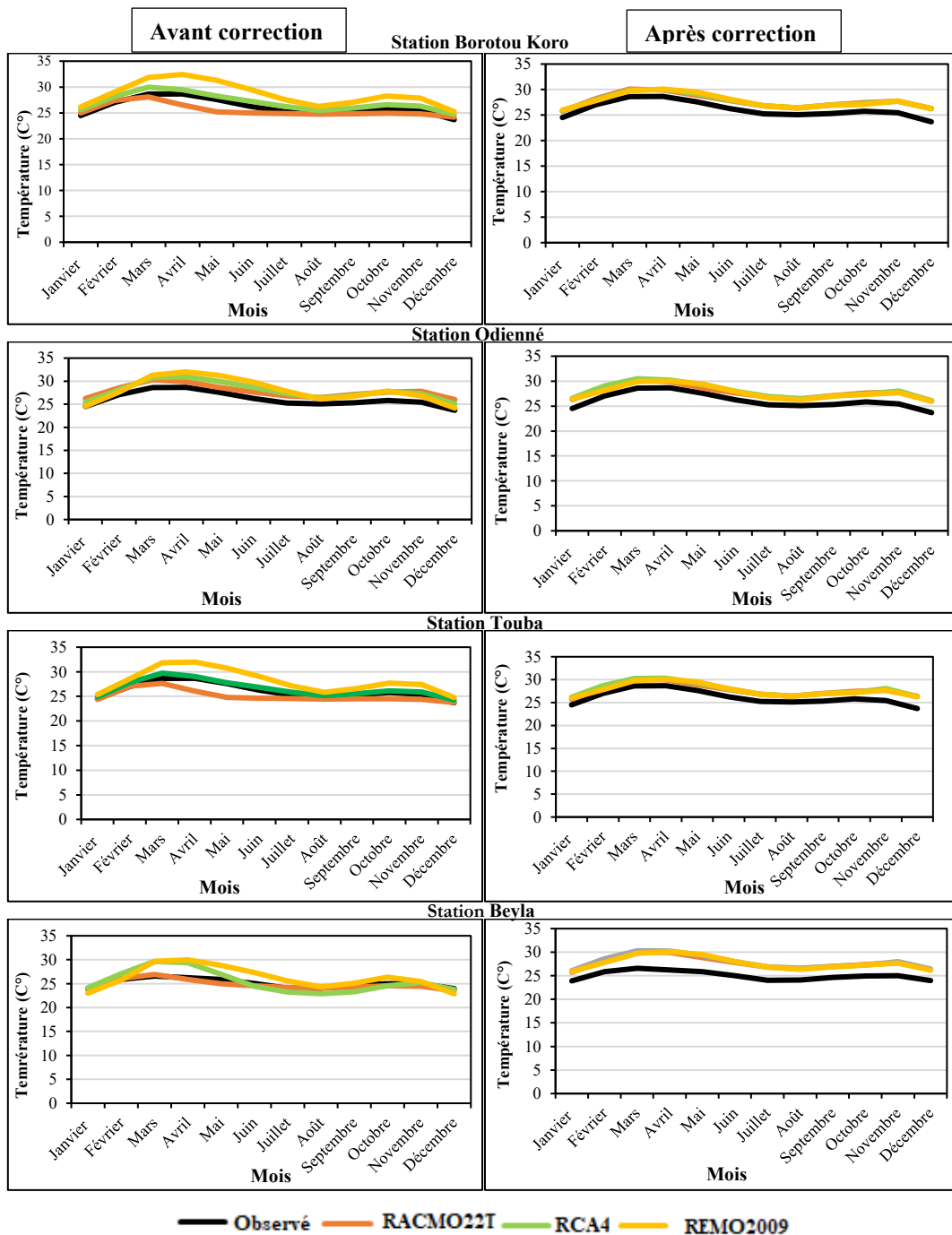


Figure 42: Évolution des températures avant et après la correction des biais aux stations du bassin versant sur la période 1970-2005.

6.6.3. Variation future des précipitations dans le bassin versant

L'application des modèles climatiques RACMO22T, RCA4 et REMO2009 au bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona montre que sous les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, tous ne sont

pas unanimes sur une baisse ou une hausse des précipitations comme le montre la figure 43. En effet, les modèles RACMO22T et RCA4 prévoient une diminution des précipitations mensuelles pour certains mois. Ainsi, d'ici 2040 et 2060, les mois d'octobre, novembre et décembre connaîtront une baisse des précipitations dans le bassin versant. Une hausse des précipitations sera observée de février à juillet. À l'échelle annuelle, ces modèles (RACMO22T et RCA4) prévoient une diminution des précipitations aux horizons 2040 et 2060 par rapport à la période de référence. Le modèle REMO2009 prévoit une augmentation mensuelle des précipitations sur presque tous les mois de l'année dans le bassin versant. Ce modèle est optimiste sur une hausse des précipitations.

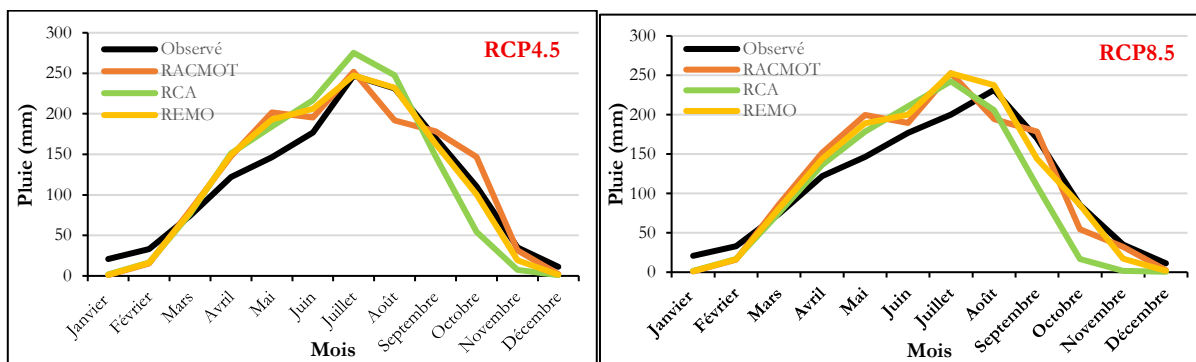


Figure 43: Évolution des précipitations mensuelles futures dans le bassin versant selon les modèles climatiques sur la période 2021-2060.

6.6.4. Variation future des températures dans le bassin versant

La variation des températures moyennes mensuelles simulées par les modèles climatiques RACMO22T, RCA4 et REMO2009 pour les horizons 2040 et 2060 par rapport à la période de référence (1970-2005) est présentée à la figure 44. Les résultats montrent que les températures connaîtront une hausse, sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Les modèles climatiques sont unanimes sur la hausse des températures durant tous les mois de l'année et les amplitudes de la température seront plus élevée sous les scénarios RCP8.5 que sous les scénarios RCP4.5.

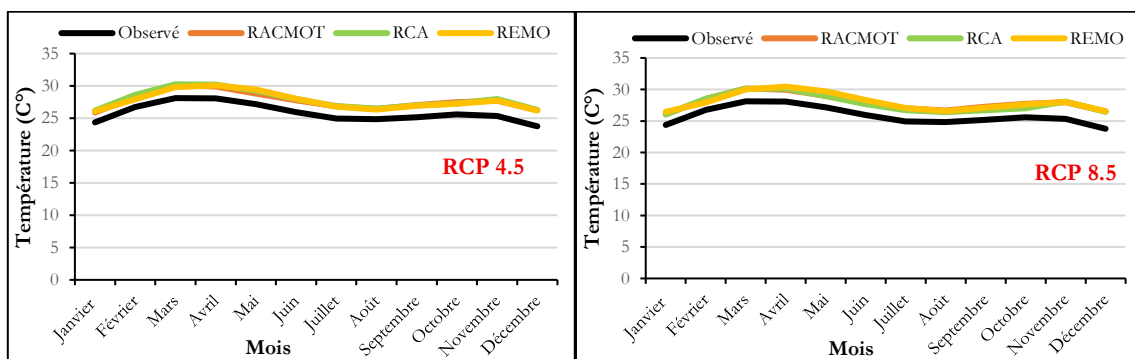


Figure 44 : Évolution des températures mensuelles futures dans le bassin versant selon les modèles climatiques sur la période 2021-2060.

Discussion

Au regard de la variation des pluies et des indices SPEI, on note que le bassin versant comme sur l'ensemble des grands bassins en Côte d'Ivoire a connu une variabilité climatique. Cette variabilité est marquée par une alternance d'années humides et sèches après la rupture constatée autour des années 1970 (Yao, 2015 ; Koffi, 2022). La baisse de la pluviométrie observée au cours de cette étude se situe en général après 1970 pour l'ensemble des stations, et s'intègre dans les périodes sèches définies par les études antérieures (Goula *et al.*, 2006; Yao *et al.*, 2012 ; N'Guessan *et al.*, 2018 ; Coulibaly *et al.*, 2018). Comme signalé par Bigot (2005), les années 1970 constituent une période très représentative de l'importante baisse de la pluviométrie en Côte d'Ivoire. La baisse pluviométrique observée a eu des répercussions sur le bilan hydrique des grands bassins versant mais surtout celle du Nord-Ouest de la Côte Ivoire. Cette affirmation a été étayée par les études de Coulibaly (2021). Les sécheresses météorologiques observées à Borotou-Koro, Odienné, Touba et Belya ont révélé que le bassin versant a été affecté par les phénomènes de sécheresse météorologique amorcé depuis 1970. Les pics de sécheresse qualifiés de sévères et extrêmes sont conformes aux résultats des travaux effectués par Mahé & Olivry (1995) et Bigot *et al.* (1998) en Afrique de l'Ouest. En Côte d'Ivoire, les travaux de Goula *et al.* (2006), Yao *et al.* (2012), Soro *et al.* (2014), Koffi *et al.* (2020) ont montré que les décennies 1970-1979, 1980-1989 et 1990-1999 ont été des périodes sèches. Cette baisse pluviométrique s'est intensifiée au cours des années 1980 et 1990 avant de connaître une légère hausse entre 2007 et 2013 (Koffi, 2022). Cette perturbation climatique affecte gravement les saisons des pluies qui depuis quelques années sont confrontées à des anomalies issues des perturbations des variables agroclimatiques qui caractérisent sa qualité (Dékoula *et al.*, 2018). En effet, le démarrage de la saison des pluies (DSP) prévu en mars dans la zone subsaharienne, débute entre la première décennie du mois d'avril et du mois de mai dans la zone sucrière avec un retard de 40 jours et un écart de 21 jours d'une station à l'autre. Ce démarrage tardif de la saison des pluies s'explique par le mouvement en zone soudanienne de la mousson humide du Sud-Ouest vers le Nord-Est. Noufé *et al.* (2015) confirment cette affirmation par l'évolution latitudinale du démarrage de la saison des pluies utiles en Côte d'Ivoire. La fin de la saison des pluies (FSP) survient en moyenne dans la deuxième décennie du mois d'Octobre avec une tendance de plus en plus précoce. Ces résultats viennent en appui à ceux de Noufé *et al.* (2015) et Dékoula *et al.* (2018) qui ont observé des fins de saison de plus en plus précoces respectivement au Nord-Est de la Côte d'Ivoire et dans la zone cotonnière ivoirienne. La longueur de la saison des pluies (LSP) comprise entre 107 et 227 jours, traduit une tendance significative au raccourcissement. Cette observation a été également mentionnée dans les

travaux de Goula *et al.* (2010) et traduit les perturbations que subissent les calendriers culturels indiqués par Diomandé *et al.* (2016). Les cumuls pluviométriques saisonniers (CPS) qui varient entre 972,7 et 1620,5 mm et les nombres de jours de pluie (NJP) qui décroissent de 90 à 49 jours sont similaires aux observations de Soro *et al.* (2013) sur le bassin versant du Haut Bandama au Nord de la Côte d'Ivoire. Les hauteurs moyennes des précipitations journalières (HMP) observées (25,1 à 11,6 mm) témoignent de la baisse de la pluviométrie sur le complexe sucrier de Borotou-Koro. Ce constat s'accorde avec ceux de Kouassi *et al.* (2010) dans le bassin versant du N'zi et Noufé *et al.* (2015) dans l'Est ivoirien. Les séquences sèches (SS) des mois de développement des cultures, ne dépassent pas 8 jours par mois. L'occurrence des SS allant de 4 à 10 jours en saison pluvieuse témoigne de la présence non négligeable de la sécheresse sur la zone d'étude. Cette situation pourrait être dommageable pour la culture de canne à sucre si elle coïncide avec la phase d'élongation. Cette remarque a été faite dans les études de N'Guessan (2002) pour la culture du riz et du maïs dans la vallée du Bandama en Côte d'Ivoire. Dès lors, la baisse importante et continue des CPS, du NJP et l'augmentation des SS ont des conséquences sur les rendements des cultures annuelles sous pluie telles que la canne à sucre. En considérant les différents stades de développement de la plante, on peut ainsi mettre en évidence un impact des séquences sèches intra-saisonnières. Si la séquence sèche apparaît durant la phase de développement végétatif comme au tallage, le rendement n'est que faiblement voire pas affecté. En revanche, si la séquence sèche survient au cours de la phase reproductive c'est-à-dire au moment des phases de floraison pendant lesquelles la plante est très sensible au stress hydrique, le rendement est très affecté. Yabi *et al.* (2012) et Diomandé *et al.* (2016) ont fait les mêmes constats pour la culture du riz pluvial et du maïs respectivement au Bénin et au Centre-Nord de la Côte d'Ivoire. Par contre, les débuts des saisons de pluies (DSP) et la longueur des saisons (LS) humides sont essentielles en agriculture pluviale (Balme, 2004). Elles permettent d'établir un calendrier cultural pendant lequel les cultures bénéficient de quantité d'eau suffisante pour leur développement. L'étude met en évidence un lien fort entre la quantité totale d'eau disponible et le rendement agricole potentiel pour une date de « planting » idéale. Cependant, une année fortement excédentaire en pluie pourra être caractérisée par des rendements médiocres et une année sèche par des rendements plus importants que ceux d'une année humide. Noufé *et al.* (2011) ont montré à cet effet, que la seule connaissance du régime pluviométrique ne suffit pas à expliquer le rendement d'une culture pluviale, parce qu'un rendement faible peut bien résulter de conditions hydriques déficitaires qu'excédentaires. Les coefficients de corrélations obtenus entre DSP, LS et les rendements agricoles observés, sont dans l'ensemble faibles et non significatifs au seuil de confiance. Ces

résultats peuvent paraître aussi surprenants, surtout pour des cultures pluviales comme la canne à sucre, dont on s'attend à ce que les rendements soient davantage sensibles à l'offre climatique en eau. Toutes ces situations traduisent une incertitude grandissante quant à l'utilité des variables agroclimatiques pour la production agricole (Alhassane *et al.*, 2013). Plusieurs raisons expliquent cette situation car la garantie d'une bonne production est tributaire des conditions liées à une bonne articulation des opérations culturales qui sont la préparation du sol, la mise en terre des boutures, l'entretien des cultures, les moments de fertilisation et usages ou non de variétés améliorées. Aussi, la pluie brute ne permet pas toujours de rendre compte de la réponse à l'eau aux plantes. Dans une approche agro climatologique proprement dite, ce sont surtout les flux du continuum sol-plante-atmosphère qu'il convient de connaître, si l'on veut bien comprendre les interactions complexes entre climat et agriculture telles que mises en évidence par Reyniers & Forest (1990). Enfin, le caractère extensif des systèmes cultureux qui, contrairement à la rationalité technique qui préconise la production par unité de surface, se traduit malheureusement ici par une logique qui maximise la production par unité de temps (Noufé *et al.*, 2011). Les projections climatiques réalisées par les modèles RACMO22T, RCA4 et REMO2009 sous les scénarios climatiques RCP4.5 et 8.5 montrent une hausse générale de la température moyenne annuelle dans le bassin versant. Les résultats de la comparaison entre les données climatiques de la période de référence (1970-2005) ont montré une croissance moyenne annuelle des températures aux horizons 2040 et 2060. Cette hausse de la température est suivie d'une baisse des précipitations en Afrique de l'Ouest comme révélée par Diallo *et al.* (2016), Sarr & Camara (2017) et Koffi (2022). En Côte d'Ivoire, plusieurs études et la notre sont unanimes sur l'augmentation de la température et d'une baisse de la pluie sur les bassins versants aux horizons futurs (Kouakou *et al.*, 2014 ; Yéo, 2017 ; Soro *et al.*, 2017 ; Coulibaly *et al.*, 2018 ; Yao *et al.*, 2019). Ces résultats confirment l'analyse de Sylla *et al.* (2018) et le dernier rapport du GIEC sur les températures attendues en Afrique de l'Ouest. En effet, l'Afrique de l'Ouest devrait être fortement affectée par la hausse des températures. L'évaluation des trois (3) modèles climatiques régionaux a révélé leur incapacité à reproduire exactement les volumes précipités et leur difficulté à simuler la dynamique saisonnière des pluies sur le bassin versant. En effet, les projections climatiques produites par les différents modèles climatiques présentent des différences marquées. Les projections sur l'Afrique de l'Ouest sont généralement plus ou moins cohérentes avec les grandes fourchettes inter-modèles pour les réponses des précipitations moyennes saisonnières (Lebel & Ali, 2009 ; Taibi *et al.*, 2017 ; Taibi & Haddad, 2019). Ces taux de sous-estimation ou de sur-estimation des données climatiques (précipitations et températures) par les trois modèles climatiques confirment bien les travaux de N'Dri *et al.*

(2019) qui affirment que toute sortie de modèle climatique est généralement biaisée. Ainsi, avant d'utiliser ces données pour la modélisation hydrologique et la détermination des besoins futurs en eau d'irrigation pour les parcelles de canne à sucre, il est fortement recommandé de corriger les erreurs issues des modèles climatiques (M'Po *et al.*, 2016 ; Yéo, 2017; Coulibaly *et al.*, 2018 ; Gauze *et al.*, 2018 ; Koffi, 2022), car la résolution de ces modèles n'est pas conforme à celle de la modélisation hydrologique.

Conclusion partielle

L'application des différentes méthodologies aux données climatiques pour la caractérisation des paramètres agroclimatiques dans le bassin versant a permis de mettre en évidence que, les paramètres agroclimatiques garants de la production agricole ont connu des perturbations dans l'ensemble. Ces perturbations se manifestent par le décalage précoce et tardive respectivement des dates de début et de fin de saison de pluie. Le raccourcissement des longueurs de saison de pluie, la diminution des cumuls pluviométriques et l'augmentation des séquences sèches au cours des saisons pluvieuses sont marqués aussi par l'hétérogénéité spatiale de la pluviométrie dans le bassin versant. Cette hétérogénéité se manifeste par une présence plus accrue des pluies dans l'Ouest du bassin versant, mais avec une baisse généralisée sur l'ensemble de la zone d'étude. La baisse de la pluie observée a été matérialisée à travers les indices SPEI. L'analyse de la sécheresse météorologique aux stations étudiées a révélé que le bassin versant a été affecté par les phénomènes de sécheresse après 1970, mais ces sécheresses restent dans leur ensemble modérée. Les perturbations climatiques ayant un impact sur les productions agricoles, un calendrier agricole a été proposé. Ce calendrier tient compte des variables climatiques (pluie, ETP) et du cycle phénologique de la canne à sucre. Ainsi l'adaptation à un calendrier cultural préconise le premier trimestre de l'année pour le planting des boutures de sorte que pendant le cycle de développement de la canne à sucre, les différents stades phénologiques bénéficient des apports de pluie appropriés. Enfin, les projections climatiques réalisées par les modèles RACMO22T, RCA4 et REMO2009, sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 montrent une hausse générale de la température dans le bassin versant mais restent divergentes quant à la hausse ou à la baisse de la pluie.

CHAPITRE 7 : ÉVALUATION DE LA DISPONIBILITÉ DE L'EAU DANS LE BASSIN VERSANT DU FLEUVE SASSANDRA À SOROTONA

Dans ce chapitre, les résultats relatifs aux caractéristiques hydrologiques du bassin versant sont présentés. Par la suite, les cartes d'occupation du sol qui ont servi de base à la simulation des écoulements sont également présentées, suivies des résultats de l'évaluation des écoulements au sein du bassin versant.

7.1. Analyse des variables d'écoulement dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

7.1.1. Coefficients d'hydraulicité annuels

La figure 45 présente la variation des coefficients d'hydraulicité à la station hydrométrique de Sorotona. L'hydraulicité à la station hydrométrique de Sorotona révèle des fluctuations marquées des débits d'une année à l'autre. Sur une période de 51 années (1970-2020), 27 années (53%) analysées enregistrent un déficit. Les fluctuations de débit les plus marquées ont été observées à partir de l'année 2000. L'année 2008 se distingue comme étant la plus abondante, avec le coefficient d'hydraulicité (Ch) de 80,3. En revanche, l'année 2004 (-60,9) présente le déficit le plus prononcé de toutes les années. Le graphique met également en évidence une différence d'amplitude considérable entre les valeurs extrêmes de l'hydraulicité, ce qui illustre parfaitement l'instabilité des débits d'une année à l'autre sur la période d'étude dans le bassin versant.

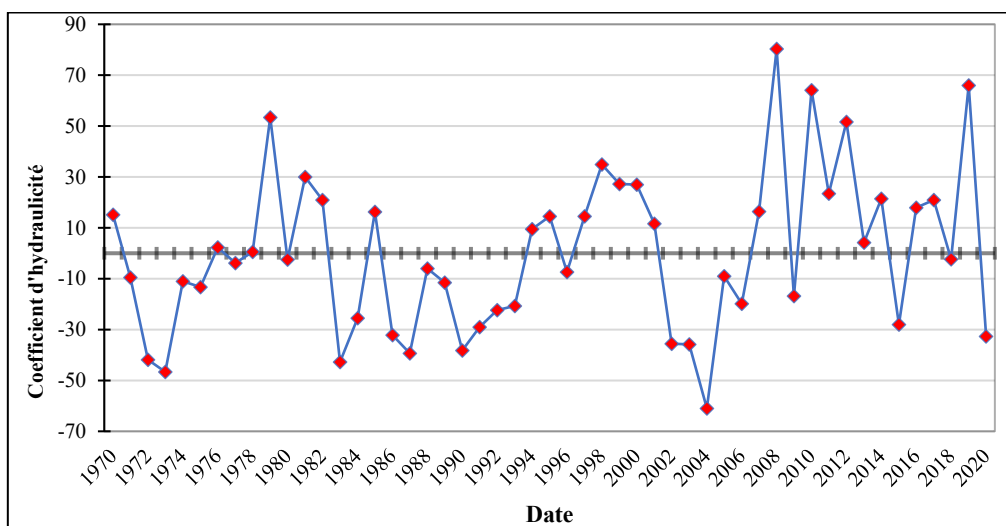


Figure 45 : Évolution des coefficients d'hydraulicité annuels à la station de Sorotona sur la période 1970-2020

7.1.2. Coefficient de variation des écoulements (Cv)

La figure 46 présente l'évolution du coefficient de variation des écoulements dans le bassin versant. L'analyse des graphes de la figure révèle que les coefficients d'écoulement varient entre 5,7 % et 23,8 %. Cette variation des coefficients témoigne d'une stabilité relativement constante du régime annuel d'écoulement au sein du bassin versant. En effet, plus le coefficient de variation des écoulements est élevé, plus les régimes des cours d'eau sont perturbés. L'analyse du graphe montre que les périodes 1978-1986, 1995-2000 et 2007-2010 sont caractérisées par un accroissement des coefficients d'écoulement, traduisant ainsi une abondance en eau dans le bassin versant.

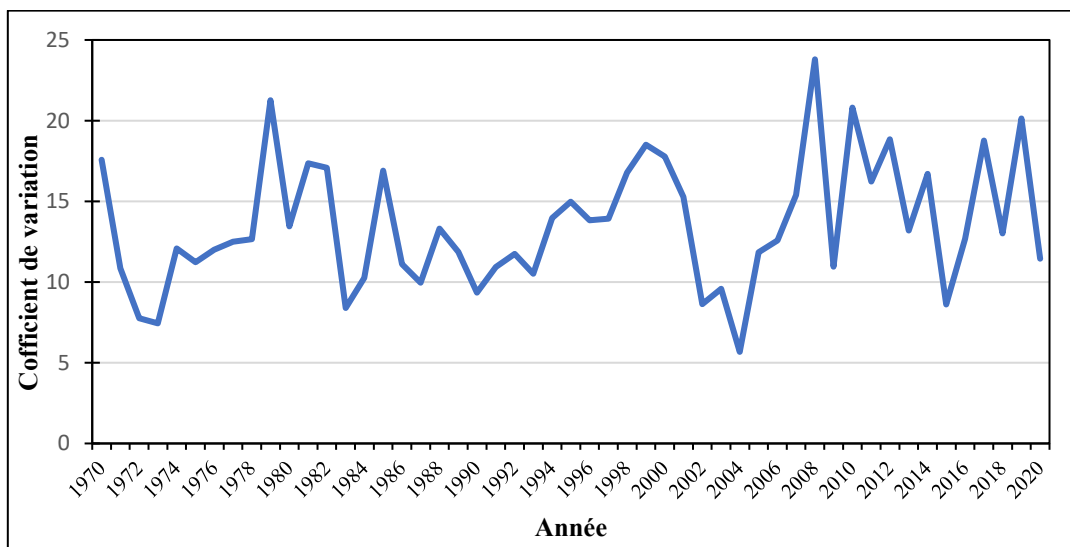


Figure 46 : Évolution du coefficient de variation des écoulements à la station hydrométrique de Sorotona sur la période 1970-2020

7.1.3. Relation pluie-débit dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

7.1.3.1. Relation pluie-débit à l'échelle annuelle dans le bassin versant

La corrélation entre les précipitations et les débits est présentée à la figure 47. Une discordance est observée entre les pluies annuelles et les lames d'eau écoulées dans le bassin versant. Ces discordances surviennent particulièrement en 1972, 1975, 1983, 1987, 1990, 2004 et 2015. On note dans le bassin versant, en 2004 et en 2016, des quantités respectives de pluie de 1318,3 mm et de 1788,1 mm enregistrées pour une réponse hydrologique de 74,8 mm et de 226,8 mm. En revanche, en 2008, des écoulements de 346,9 mm ont été générés pour une hauteur de pluie de 1557,3 mm. Ces divergences sont parfois attribuables à la situation pluviométrique des années précédentes. Avec cette instabilité observée entre les lames d'eau précipitées et celles écoulées durant la période d'étude, il apparaît clairement que le bassin versant ne réagit pas immédiatement à la pluie en termes d'écoulement à un pas de temps annuel.

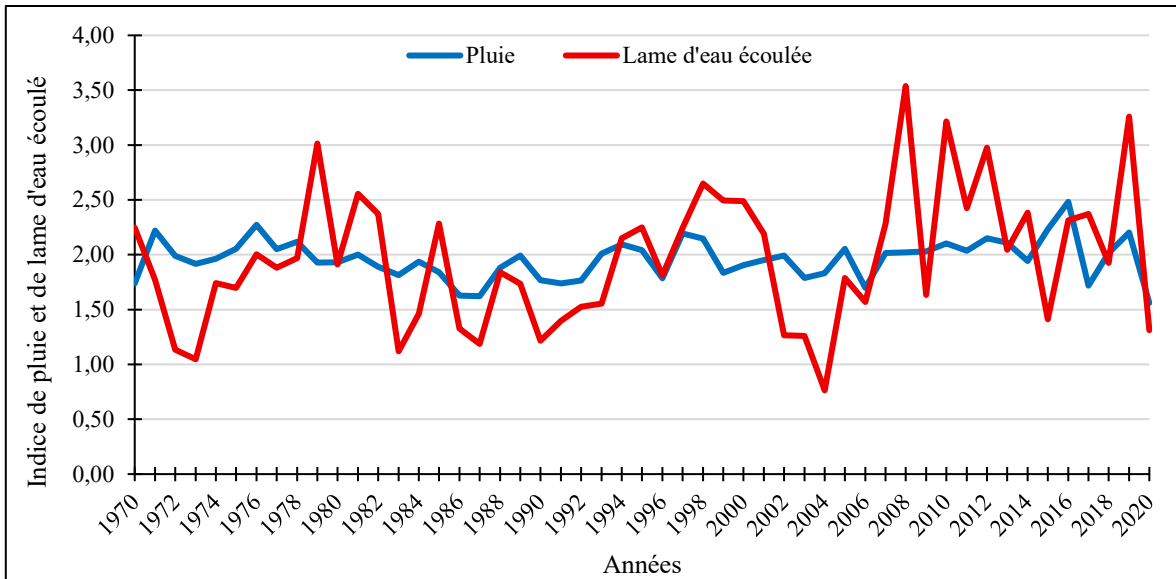


Figure 47 : Évolution annuelle comparée de la pluie et des lames d'eau écoulées dans le bassin versant sur la période 1970-2020

7.1.3.2. Relation pluie-débit à l'échelle mensuelle dans le bassin versant

La figure 48 illustre la relation entre les pluies et les débits dans le bassin versant à l'échelle mensuelle. D'une manière générale, les mois pluvieux correspondent aux phases de hautes eaux et les mois de déficit pluviométrique aux basses eaux. Les cumuls pluviométriques maximums sont observés en août dans l'ensemble du bassin versant, avec une hauteur de 257,7 mm. Quant aux débits maximums, ils sont enregistrés en septembre, avec 56,3 mm de lame d'eau écoulée, reflétant l'effet cumulatif des écoulements des mois antérieurs. Une explication similaire peut être avancée pour les écarts entre les hauteurs minimales de précipitations enregistrées en octobre et les faibles débits d'eau observés à partir de novembre.

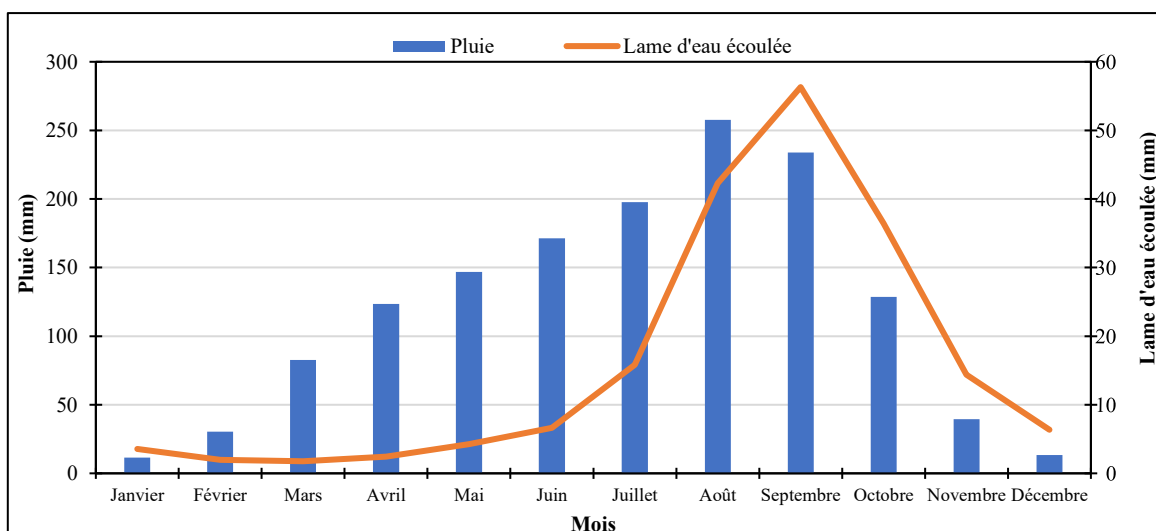


Figure 48 : Évolution mensuelle comparée de la pluie et des lames d'eau écoulées dans le bassin versant sur la période 1970-2020

7.1.3.3. Corrélation pluie-débit dans le bassin versant

La figure 49 illustre une dispersion des points représentant les débits en fonction des précipitations. Sur l'ensemble du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona, la corrélation moyenne sur la période d'étude entre la pluie et les lames d'eau écoulée est de 0,40. Ce coefficient indique qu'une proportion considérable des pluies tombées dans le bassin versant ne s'écoulent pas. Cette fraction d'eau pourrait être retenue dans des zones de dépression ou des vastes zones humides réparties sur l'ensemble du bassin versant. Ce coefficient met également en lumière le caractère perméable du bassin versant, étant donné les quantités d'eau qui s'infiltrent annuellement et qui perturbent significativement la relation entre les précipitations et les débits.

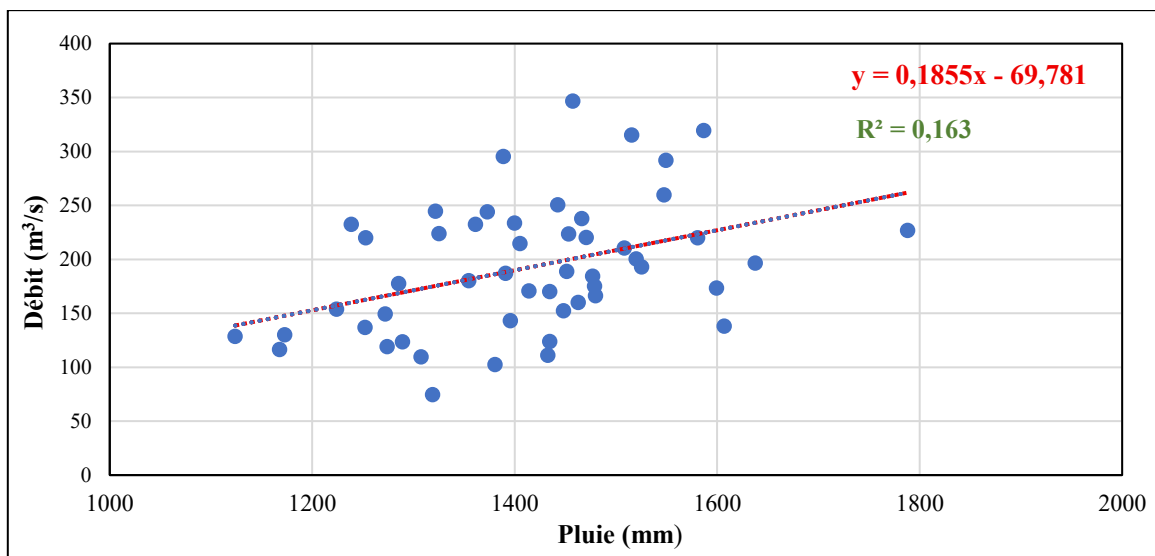


Figure 49 : Corrélation annuelle entre la pluie et les lames d'eau écoulées dans le bassin versant sur la période 1970-2020

7.1.4. Analyse des déficits d'écoulement dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

7.1.4.1. Analyse des lames d'eau écoulées et du déficit d'écoulement à l'échelle annuelle

L'évolution des précipitations, des lames d'eau écoulées et des déficits d'écoulement est présentée à la figure 50. On observe des écoulements variants entre 74 mm et 346,9 mm d'eau, consécutifs à des pluies de 1123,9 mm et 1788,1 mm. Les déficits moyens annuels d'écoulement restent généralement élevés, fluctuant entre 995,2 mm et 1561,3 mm par an. Une corrélation étroite lie les quantités d'eau précipitée, écoulée et déficitaire. Cette corrélation se manifeste simultanément, mais avec une variation spatiale dans le bassin versant. En effet, les zones d'écoulement se différencient en fonction de divers facteurs tels que la lithologie du sol,

l'occupation du sol, la densité démographique et le climat. D'un point de vue hydrologique, les régions recevant davantage de précipitations connaissent un écoulement plus important. Cependant, la réalité est tout autre dans le bassin versant du Sassandra à Sorotona. Les forts déficits d'écoulement sont largement dus à l'inégalité répartition pluviométrique dans le bassin versant, aux couverts végétaux présents, à l'élévation de l'évapotranspiration.

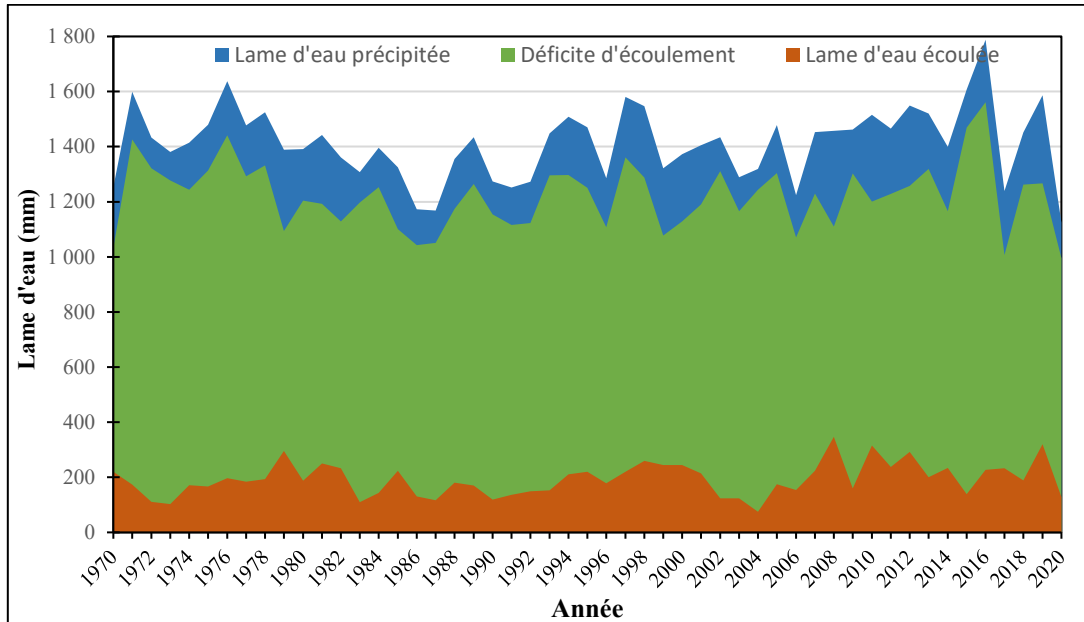


Figure 50 : Évolution annuelle des pluies, des lames d'eau écoulée et du déficit d'écoulement dans le bassin versant de 1970 à 2020

7.1.4.2. Analyse des lames d'eau écoulées et déficit d'écoulement à l'échelle mensuelle

Les graphes de la figure 51 permettent de suivre l'évolution des pluies, des lames d'eau et des déficits d'écoulements dans le bassin versant à l'échelle mensuelle. Le déficit d'écoulement est très important pendant la période des basses eaux (janvier et mai). A cette période, le déficit d'écoulement atteint 135 mm d'eau. A partir de juin, avec l'arrivée des premières pluies suite à une longue période de sécheresse, le déficit d'écoulement commence à diminuer mais reste toujours supérieur aux écoulements. En juillet, le déficit d'écoulement devient faible par rapport à la pluviométrie et on peut observer une hausse des lames d'eau écoulées jusqu'en septembre. Mais les proportions sont largement en dessous du déficit et ceci jusqu'au mois de décembre. L'analyse des lames d'eau écoulées et le déficit d'écoulement permet de mettre en évidence la répartition des saisons (sèche ou humide) dans le bassin versant.

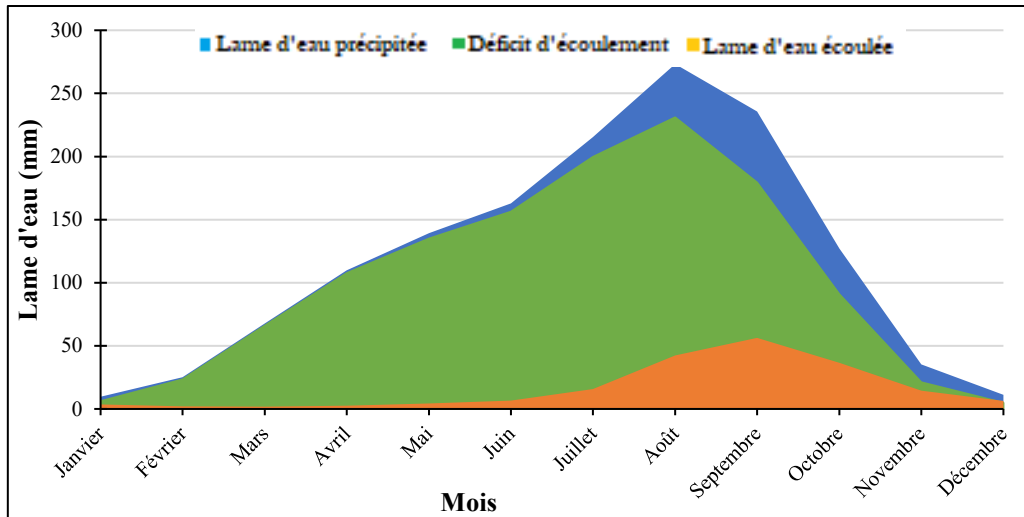


Figure 51 : Évolution mensuelle des pluies, des lames d'eau écoulée et du déficit d'écoulement de 1970 à 2020

7.1.5. Analyse des écoulements dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

7.1.5.1. Analyse des modules d'écoulements interannuels dans le bassin versant

La figure 52 permet de suivre l'évolution interannuelle des modules d'écoulements dans le bassin versant. Les modules d'écoulement augmentent avec la superficie drainée. Ainsi, le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona qui draine une superficie d'environ 18 581 km² est soumis à des conditions physico-géographiques favorables à l'écoulement. Une abondance des précipitations (1432 mm) favorise un apport de débit moyen annuel supérieur à 100 m³/s sur la période d'étude (1970-2020). Le maximum des modules d'écoulement est atteint en 2008 avec un débit de 203,3 m³/s, alors que le minimum survient en 2004 avec 44 m³/s. Dans le bassin versant sur la période d'étude, les modules d'écoulements sont toujours supérieurs à 50 m³/s.

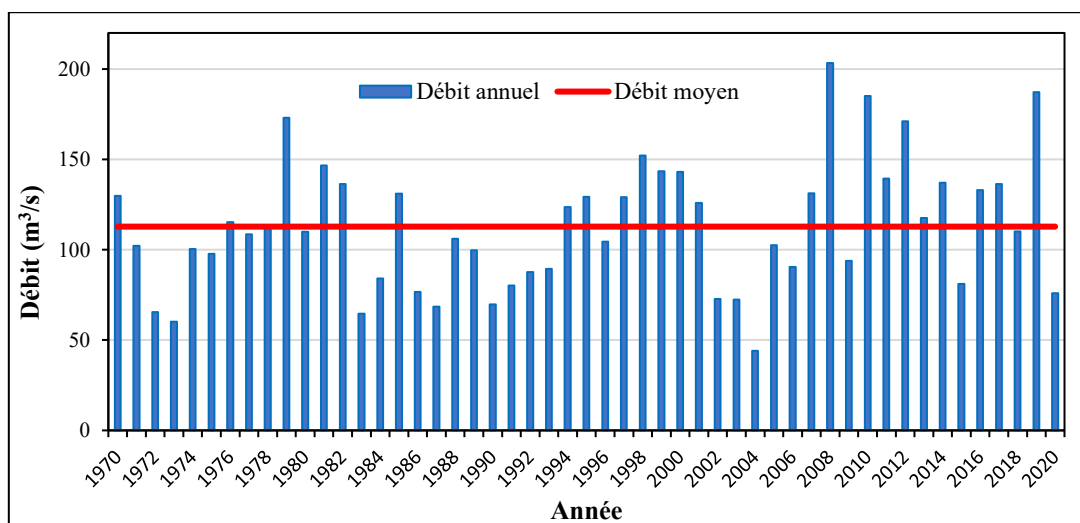


Figure 52 : Évolution des modules annuels d'écoulements dans le bassin versant (1970-2020)

7.1.5.2. Analyse des écoulements maximums annuels dans le bassin versant

La figure 53 présente l'évolution des écoulements maximums sur la période 1970-2020. L'analyse des graphes montre que les écoulements sont importants dans le bassin versant. En effet, les écoulements maximums correspondant aux périodes de hautes eaux qui témoignent l'importante contribution des précipitations à l'écoulement. Après la chute des débits au début des années 1970, les écoulements maximums restent constants entre 250 et 500 m³/s jusqu'en 2002. En 2004, les écoulements ont connu les plus faibles valeurs estimées à 101,2 m³/s sur la période d'étude. Par ailleurs, les hautes valeurs de débits sont atteintes sur la période de 2007 à 2014, avec des débits de 761,7 m³/s. On retient que le débit moyen maximal est de 420,5 m³/s.

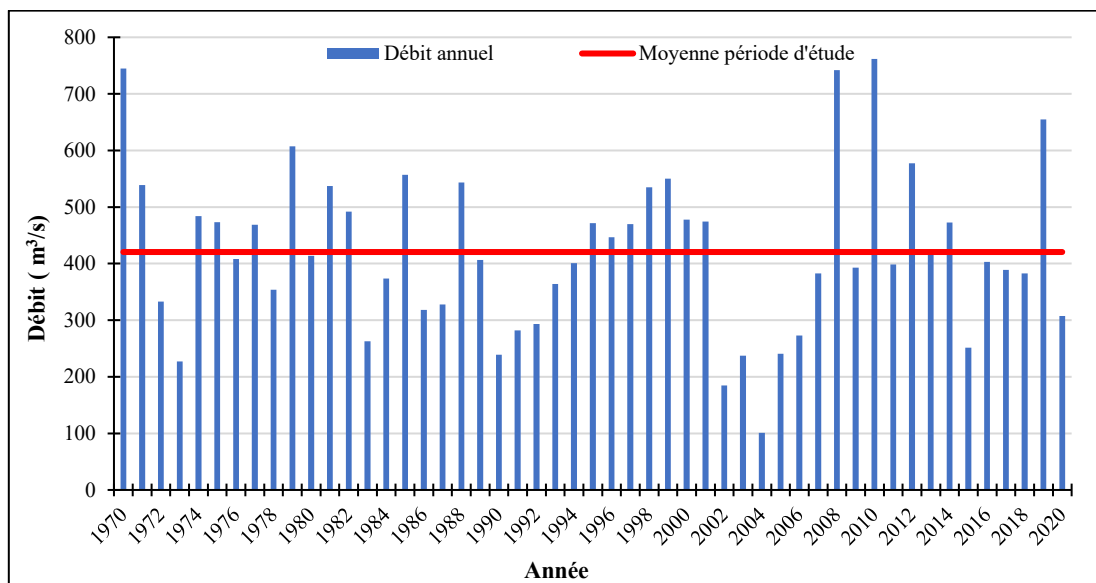


Figure 53 : Évolution des écoulements maximums annuels dans le bassin versant sur la période 1970-2020

7.1.5.3. Analyse des écoulements minimums annuels dans le bassin versant

Les écoulements minimums suivent presque la même variation que les écoulements maximums (Figure 54). Ainsi, après la chute des débits en 1970, on note une baisse prolongée des écoulements minimums de 1971 à 1993. A la suite de cette période, on peut observer une hausse progressive des écoulements sur le reste de la période d'étude où les écoulements minimums atteignent leurs pics en 2017 avec une valeur de 28,9 m³/s. Dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona, les affluents majeurs ne produisent presque plus de débit en période de basse eau. Seul le Bagbé, affluent principal de rive gauche maintient les écoulements.

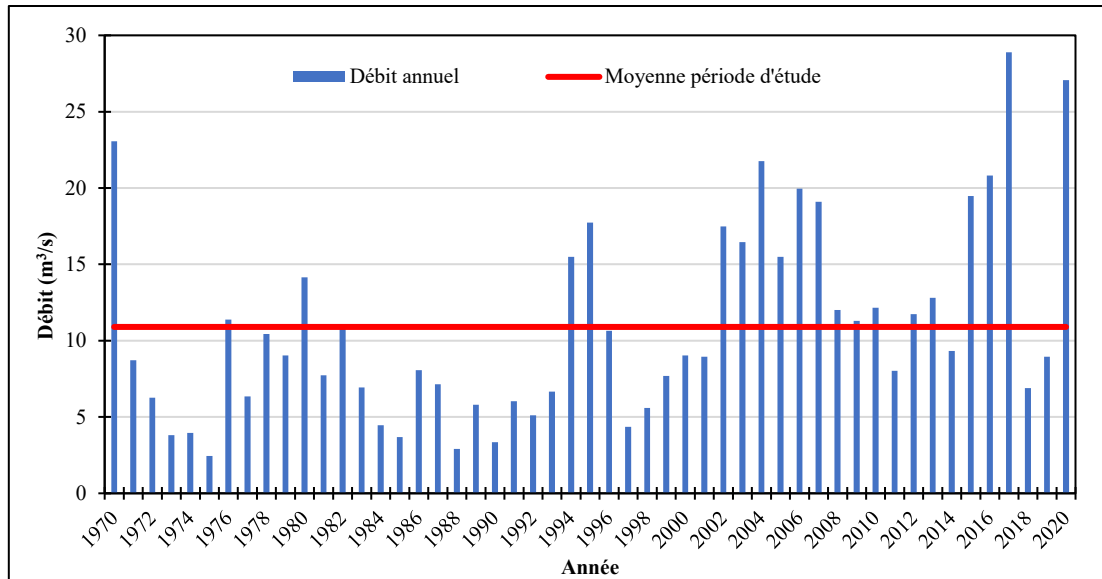


Figure 54 : Évolution des minimas annuels d’écoulements dans le bassin versant sur la période 1970-2020

7.1.5.4. Analyse des écoulements maximums mensuels dans le bassin versant

Les écoulements maximums mensuels dans le bassin versant suivent une évolution graduelle sur les douze mois de l’année en fonction des précipitations. Les histogrammes de la figure 55 montrent que la période des hautes eaux est marquée sur quatre mois successifs ; de juillet à novembre avec des débits qui varient entre 231,7 et 761,7 m³/s. Cette hausse des eaux est du fait de l’importance relative des précipitations sur l’ensemble du bassin versant. Ainsi les pics d’écoulement des eaux sont atteints au mois de septembre de chaque année.

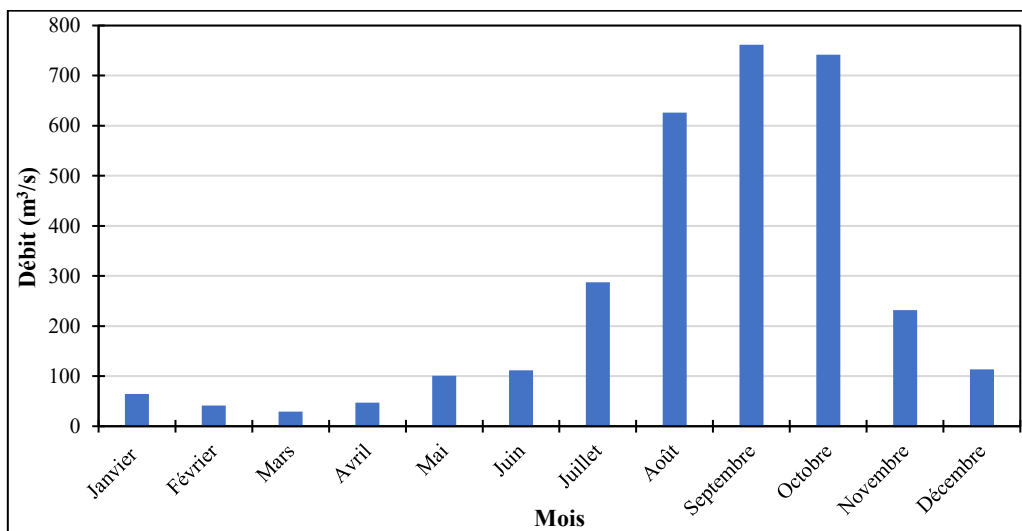


Figure 55 : Évolution des écoulements mensuels maximums le bassin versant sur la période 1970-2020

7.1.5.5. Analyse des écoulements minimums mensuels dans le bassin versant

L'analyse des histogrammes de la figure 56, montre que les écoulements minimaux mensuels varient entre 2,4 et 101,2 m³/s à l'exutoire du bassin versant. En effet, les faibles écoulements sont enregistrés sur les mois successifs de décembre à juin, avec des débits moyens mensuels qui atteignent leur minimum absolu au mois de mars (2,4 m³/s). Sur cette période (décembre à juin), selon l'état de surface du sol sur le bassin versant, une grande partie de la lame d'eau précipitée, est déjà écoulee et la hausse de l'évaporation augmente la baisse des eaux.

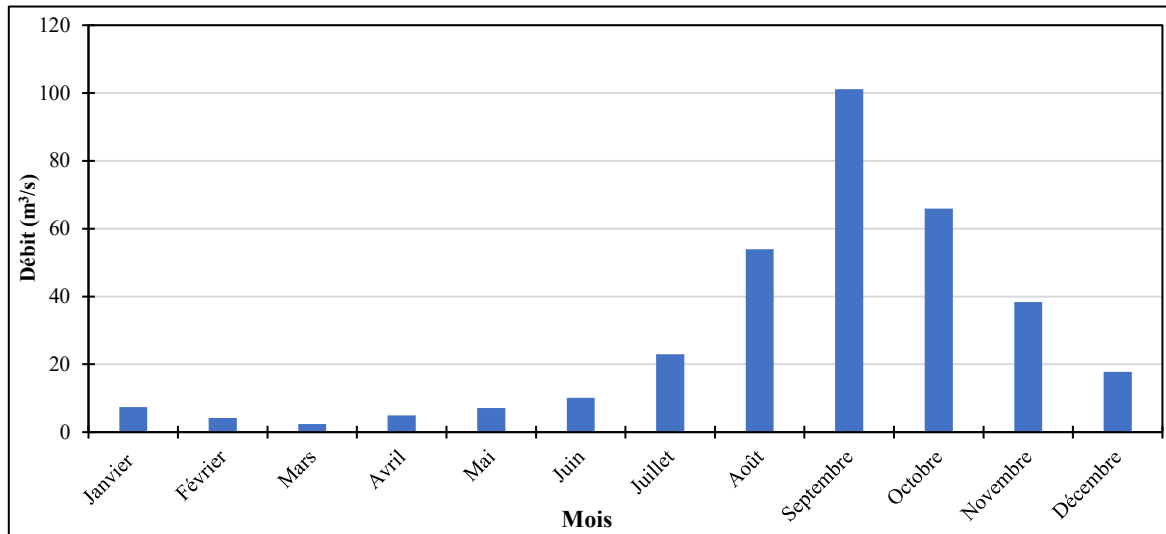


Figure 56 : Évolution des écoulements mensuels minimums le bassin versant sur la période 1970-2020

7.1.6. Détermination du régime hydrologique dans le bassin versant

La figure 57 présente l'évolution du régime hydrologique dans le bassin versant. On observe une période de hautes eaux et une période de basses eaux, relativement à l'analyse des graphes issus des valeurs du coefficient moyen de débit (CMD). Ainsi la période de hautes eaux s'étend de juillet à novembre, avec un pic en septembre, correspondant au coefficient mensuel le plus élevé (3,6). Après le mois de novembre, la période de hautes eaux se réduit progressivement, atteignant un CMD de 1. Ainsi, les valeurs minimales mensuelles du CMD fluctuent entre 0,1 et 0,4 et couvrent les mois de décembre à juin.

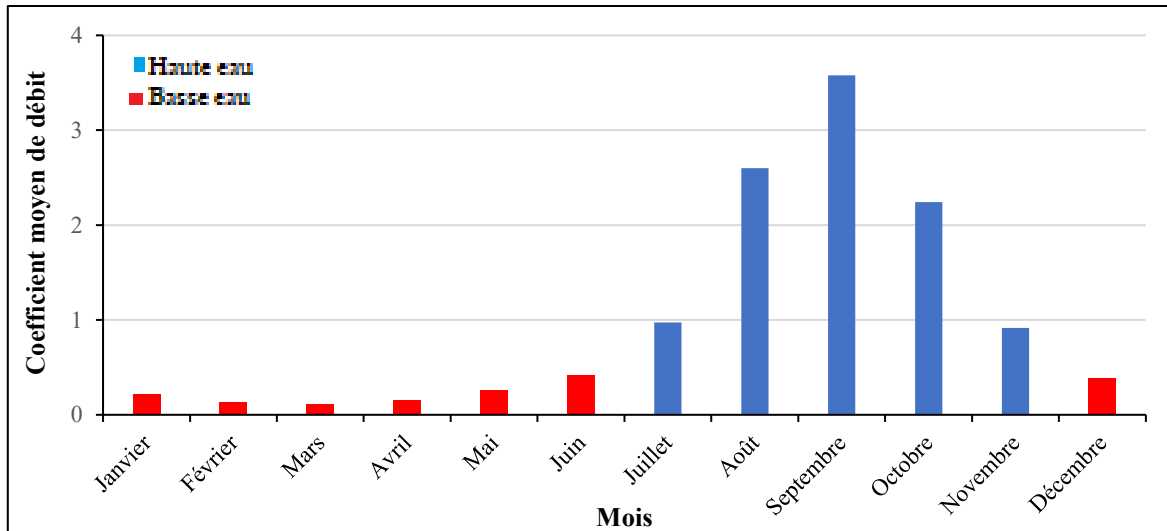


Figure 57 : Régime hydrologique des écoulements dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona sur la période 1970-2020

7.1.7. Application du test de Mann-Kendall aux séries de débits mensuels

7.1.7.1. Analyse des tendances dans les séries de débits mensuels sur le bassin versant

Les résultats de l'analyse du test de Mann-Kendall concernant les débits minimaux, moyens et maximaux mensuels sont présentés dans le tableau XXIV. Les p-valeurs mensuelles calculées inférieures au seuil de significativité de 0,01 indiquent l'existence d'une tendance. Tandis que celles supérieures au seuil témoignent de l'absence de tendance. Les débits minimums (Dmin), moyens (Dmoy) et maximums (Dmax) examinés présentent généralement une absence de tendances significatives pour la plupart des mois de l'année, à l'exception des mois de juillet, octobre, novembre et décembre. Ces derniers révèlent des tendances significatives avec des p-valeurs inférieures à 0,01, dénotant ainsi l'existence de tendances marquées à ces périodes de l'année. Les tendances à la hausse significative ont été observées pour les débits minimaux et moyens durant les mois de juillet, octobre et novembre. Concernant les débits maximums, les mêmes tendances sont observées en novembre et décembre. Ainsi, les mois de décembre à juin, qui représentent les mois les plus secs de l'année, ne révèlent pas de tendances significatives, tandis que les mois de juillet à novembre, les plus humides, démontrent des tendances à la hausse significatives.

Tableau XXIV : Tendances dans la chronique des débits mensuels à la station de Sorotona (1970-2020)

| Débit minimum (m³/s) | | | | | |
|--|-------|--------|-------|-------|--------------|
| | s | VarS | tau | Z | p-value |
| Janvier | 66,0 | 7924,7 | 0,081 | 0,730 | 0,465 |
| Février | 91,0 | 7925,7 | 0,111 | 1,011 | 0,312 |
| Mars | 173,0 | 7925,7 | 0,211 | 1,932 | 0,053 |
| Avril | 10,0 | 7924,7 | 0,012 | 0,101 | 0,920 |
| Mai | 199,0 | 7923,7 | 0,243 | 2,224 | 0,026 |
| Juin | 218,0 | 7924,7 | 0,266 | 2,438 | 0,015 |
| Juillet | 267,0 | 7923,7 | 0,326 | 2,988 | 0,003 |
| Août | 141,0 | 7925,7 | 0,172 | 1,573 | 0,116 |
| Septembre | 191,0 | 7925,7 | 0,233 | 2,134 | 0,033 |
| Octobre | 304,0 | 7922,7 | 0,372 | 3,404 | 0,001 |
| Novembre | 281,0 | 7925,7 | 0,343 | 3,145 | 0,002 |
| Décembre | 92,0 | 7922,7 | 0,112 | 1,022 | 0,307 |
| Débit moyen (m³/s) | | | | | |
| | s | VarS | tau | Z | p-value |
| Janvier | 26,0 | 7926,7 | 0,032 | 0,281 | 0,779 |
| Février | 64,0 | 7926,7 | 0,078 | 0,708 | 0,479 |
| Mars | 158,0 | 7926,7 | 0,193 | 1,763 | 0,078 |
| Avril | 112,0 | 7926,7 | 0,137 | 1,247 | 0,213 |
| Mai | 88,0 | 7926,7 | 0,107 | 0,977 | 0,329 |
| Juin | 230,0 | 7926,7 | 0,280 | 2,572 | 0,010 |
| Juillet | 238,0 | 7926,7 | 0,290 | 2,662 | 0,008 |
| Août | 105,0 | 7925,7 | 0,128 | 1,168 | 0,243 |
| Septembre | 62,0 | 7926,7 | 0,076 | 0,685 | 0,493 |
| Octobre | 272,0 | 7926,7 | 0,332 | 3,044 | 0,002 |
| Novembre | 252,0 | 7926,7 | 0,307 | 2,819 | 0,005 |
| Décembre | 206,0 | 7926,7 | 0,251 | 2,303 | 0,021 |
| Débit maximum (m³/s) | | | | | |
| | s | VarS | tau | Z | p-value |
| Janvier | 34,0 | 7922,7 | 0,042 | 0,371 | 0,711 |
| Février | 31,0 | 7921,7 | 0,038 | 0,337 | 0,736 |
| Mars | 47,0 | 7925,7 | 0,057 | 0,517 | 0,605 |
| Avril | 137,0 | 7925,7 | 0,167 | 1,528 | 0,127 |
| Mai | 88,0 | 7926,7 | 0,107 | 0,977 | 0,329 |
| Juin | 215,0 | 7925,7 | 0,262 | 2,404 | 0,016 |
| Juillet | 152,0 | 7924,7 | 0,186 | 1,696 | 0,090 |
| Août | 75,0 | 7925,7 | 0,092 | 0,831 | 0,406 |
| Septembre | 41,0 | 7923,7 | 0,050 | 0,449 | 0,653 |
| Octobre | 182,0 | 7924,7 | 0,222 | 2,033 | 0,042 |
| Novembre | 245,0 | 7925,7 | 0,299 | 2,741 | 0,006 |
| Décembre | 271,0 | 7925,7 | 0,331 | 3,033 | 0,002 |

S : Estimation de Sen ; **VarS** : Variance de l'estimation de Sen ; **taux** : Coefficient de corrélation ; **Z** : Pente ; **p-value** : probabilité d'observation.

*Les valeur en rouge sont les valeurs inférieures à 0,01

7.1.7.2. Test de Mann-Kendall séquentiel dans les séries de débits mensuels dans le bassin versant

La figure 58 présente le test séquentiel de Mann-Kendall appliqué aux séries de débits mensuels. Seules les tendances significatives indiquées par le test de Mann-Kendall dans le tableau XXIV sont présentées. Les tendances observées au niveau des débits minimaux sont toutes survenues en 1970. La première tendance à la baisse significative est survenue au mois de juillet 1970 (Figure 58A). Cette période correspond au mois à forts écoulements dans le bassin versant. Les deux autres tendances sont à la hausse des écoulements et surviennent en novembre 1970 (Figure 58B) et décembre 1970 (Figure 58C). Ces tendances indiquent une hausse dans les écoulements par rapport à la normale en période d'étiage, puisque les mois de novembre et décembre sont les mois secs dans le bassin versant. Quant aux écoulements moyens dans le bassin versant, les tendances significatives enregistrées sont circonscrites en juillet, novembre et décembre. En effet, les mois de juillet (Figure 58D) et décembre 1970 (Figure 58E) présentent des tendances à la hausse des écoulements moyens. Au cours de l'année 1990, ces tendances à la hausse des écoulements vont connaître une régression. Enfin, dans la série des débits maximaux, les différentes tendances significatives détectées par le test de Mann-Kendall ont débuté en novembre et décembre 1999 comme présenté par les figures 58G et 58H.

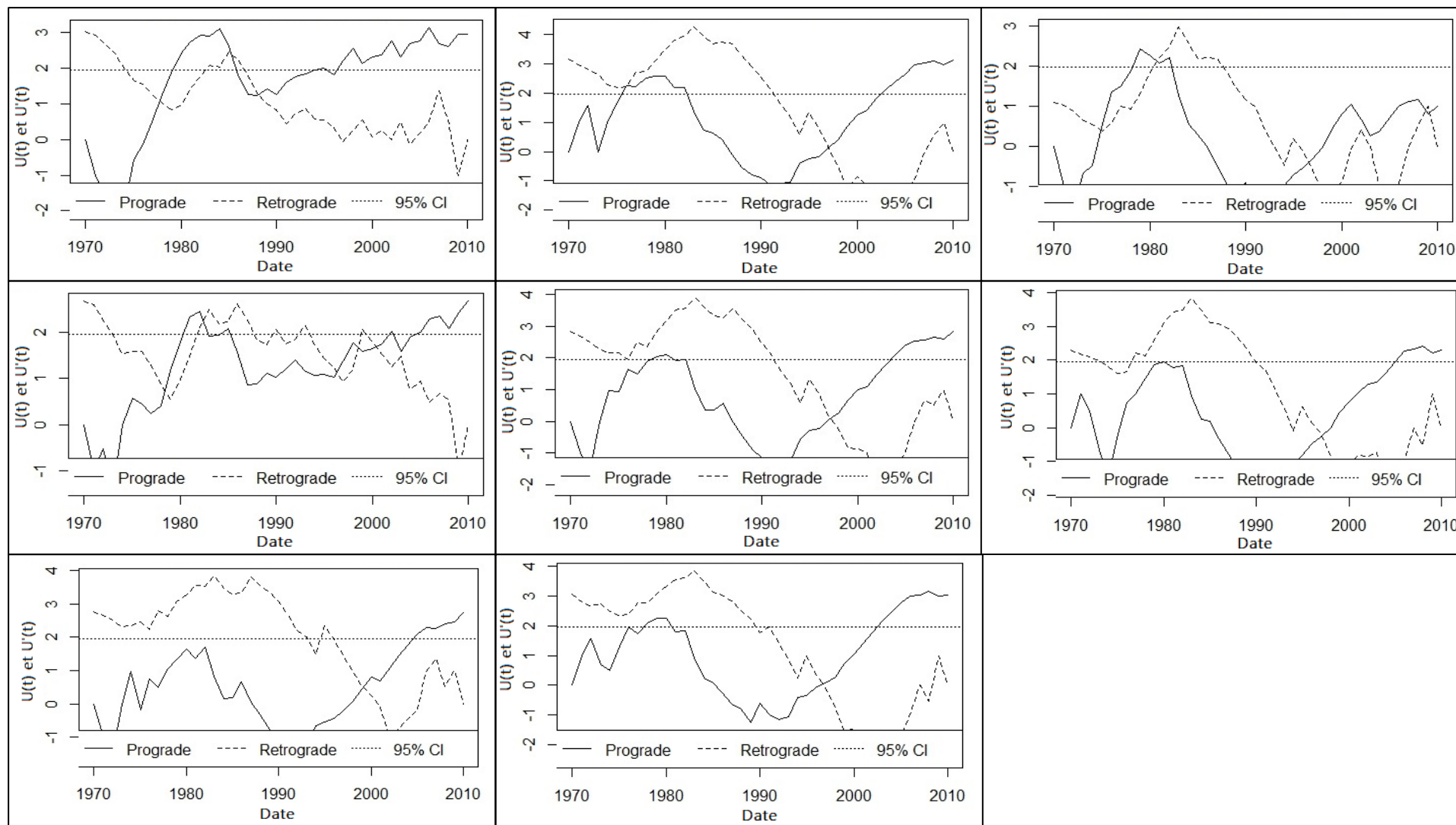


Figure 58 : Suivi des dates de début de rupture dans les séries de débits à la station de Sorotona sur la période 1970-2020.

7.2. Analyse des écoulements journaliers dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

7.2.1. Écoulements moyens journaliers dans le bassin versant

La figure 59 illustre l'évolution des débits journaliers dans le bassin versant. L'analyse de la figure révèle des grands débits d'écoulements entre les mois de juillet et novembre, correspondant à la période des hautes eaux. Les débits commencent à augmenter dès la première décennie de juillet pour atteindre leur pic (500 m³/s) lors de la deuxième décennie de septembre. À mesure que les pluies se raréfient progressivement, on observe une diminution des volumes d'eau écoulee jusqu'à la fin du mois de janvier. Les mois de décembre à juin, correspondent à la période des basses eaux. Les écoulements atteignent leurs niveaux les plus bas, ne dépassant pas ainsi 10 m³/s jusqu'à la deuxième décennie d'avril.

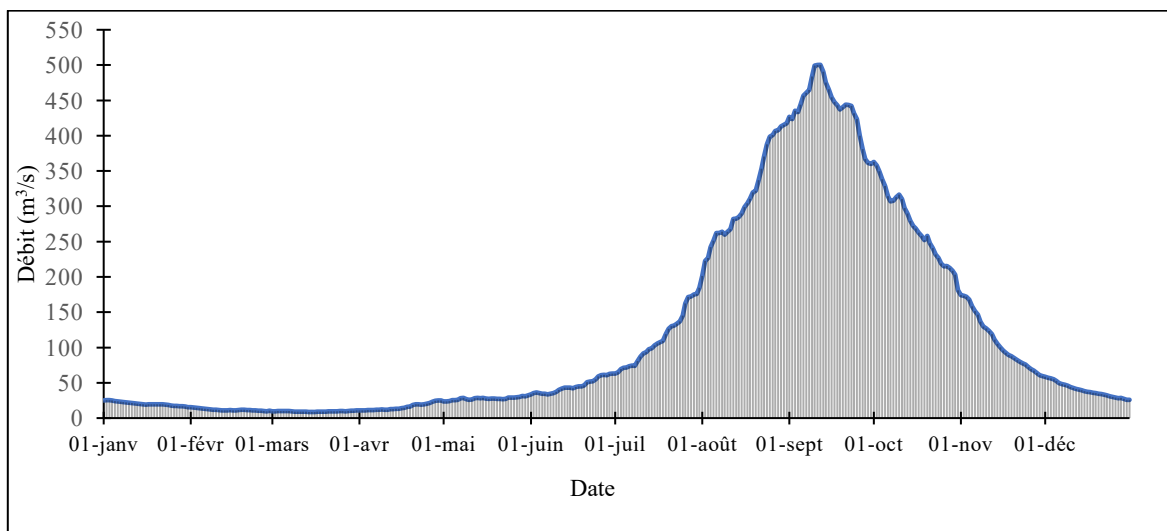


Figure 59 : Évolution des débits journaliers à la station de Sorotona sur la période 1970-2020

7.2.2. Débits classés dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

Les débits classés par ordre décroissant de la station de Sorotona sur la période 1970-2020 sont présentés à la figure 60. Le débit maximal enregistré durant cette période d'étude s'élève à 500,3 m³/s. Il est observé pendant la deuxième décennie de septembre, représentant quatre fois le module annuel. En revanche, le débit minimal d'écoulement est de 8,7 m³/s, enregistré pendant la deuxième décennie de mars. L'examen du graphique des débits classés révèle que 68 % des débits sont inférieurs au module. Cela signifie que 32 % des débits excèdent ledit module. Cette répartition des proportions des débits classés illustre ainsi les longues périodes des basses eaux.

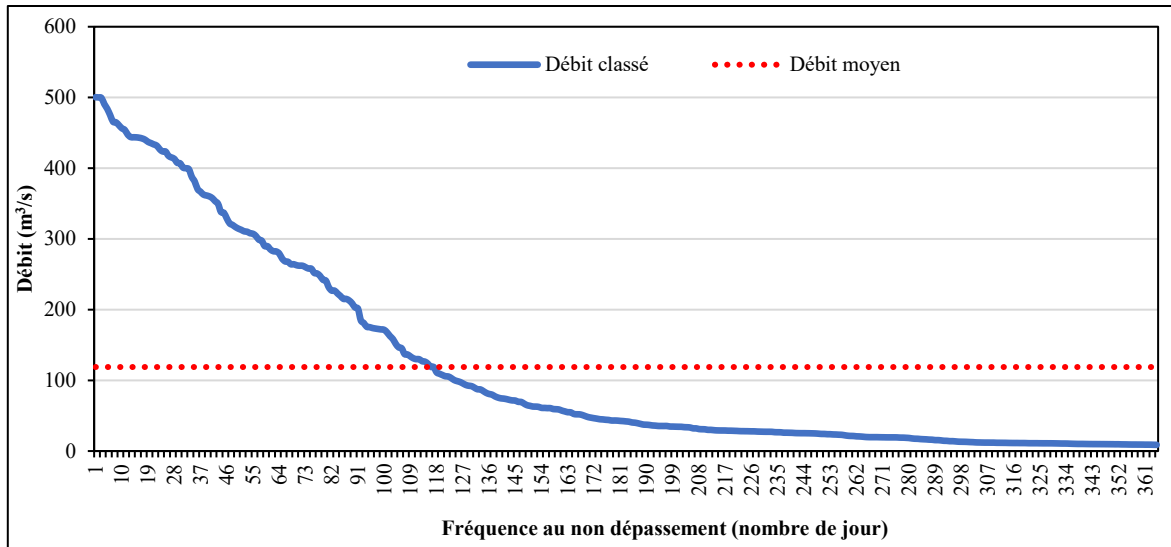


Figure 60 : Évolution des débits classés à la station de Sorotona sur la période d'étude 1970-2020

7.2.3. Fréquence des débits journaliers

La figure 61 présente les fréquences des débits journaliers dans le bassin versant. Selon la classification des débits journaliers, il est possible de caractériser les débits les plus fréquents, qui représentent la véritable ressource en eau du bassin versant du Sassandra à Sorotona. Les histogrammes révèlent que 28% des débits journaliers se situe entre 0 et 20 m³/s. Les débits compris entre 20 et 40 m³/s ont une fréquence de 21% dans les écoulements annuels. Les autres classes de débits (40 à 60 m³/s, 60 à 80 m³/s et 80 à 100 m³/s) sont inférieures à 10% des écoulements annuels. Enfin, la classe des débits supérieurs à 100 m³/s cumule la plus grande fréquence (33,9%) bien qu'elle reste concentrée sur une période bien distincte. Dans l'ensemble, ce sont les débits les plus basses qui prédominent sur l'ensemble de l'année.

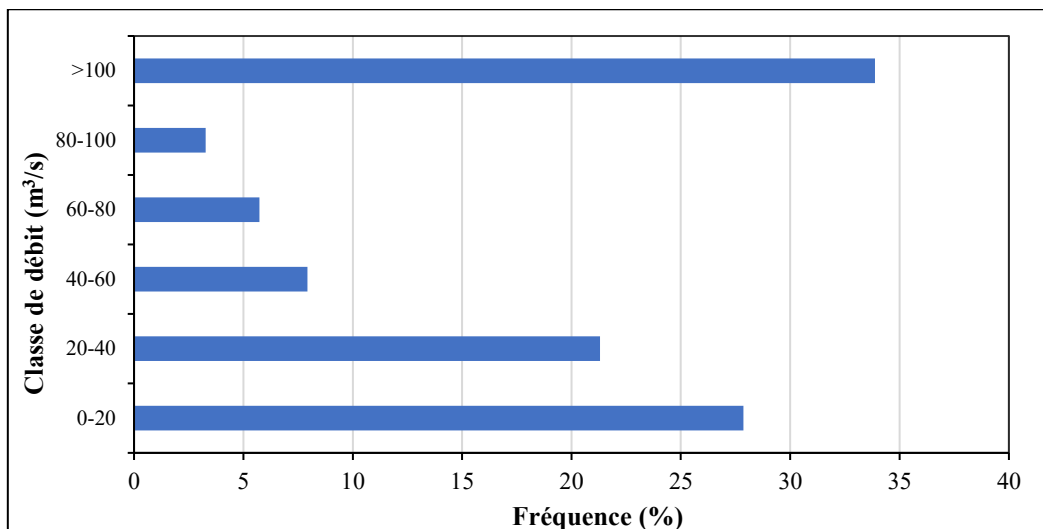


Figure 61 : Histogramme de la fréquence des débits journaliers en fonction des classes de débit à la station de Sorotona sur la période 1970-2020.

7.2.4. Étude des étiages dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona (1970- 2020)

7.2.4.1. Débits caractéristiques d'étiage (DCE)

La figure 62 montre l'évolution des débits caractéristiques d'étiage sur la période d'étude 1970-2020. On constate une baisse brutale des DCE après 1970, année caractérisant les grandes modifications climatiques en Afrique de l'Ouest. Suite à cette baisse des écoulements, le graphe présente une sévérité des étiages sur la période de 1987 à 1992 avec des débits atteignant 2 m³/s. Après cette période d'étiage sévère, une longue période (1993-2020) de hausse progressive des écoulements est amorcée avec un maxima de 11,9 m³/s atteint en 1995. Sur l'ensemble de la période d'étude, les DCE restent très variants entre 2 m³/s et 15,7 m³/s avec une moyenne de 7,1 m³/s. Sur les deux dernières décennies de la période d'étude (2000-2020), les DCE évoluent dans des proportions intéressantes pour la satisfaction des besoins hydriques dans le bassin versant.

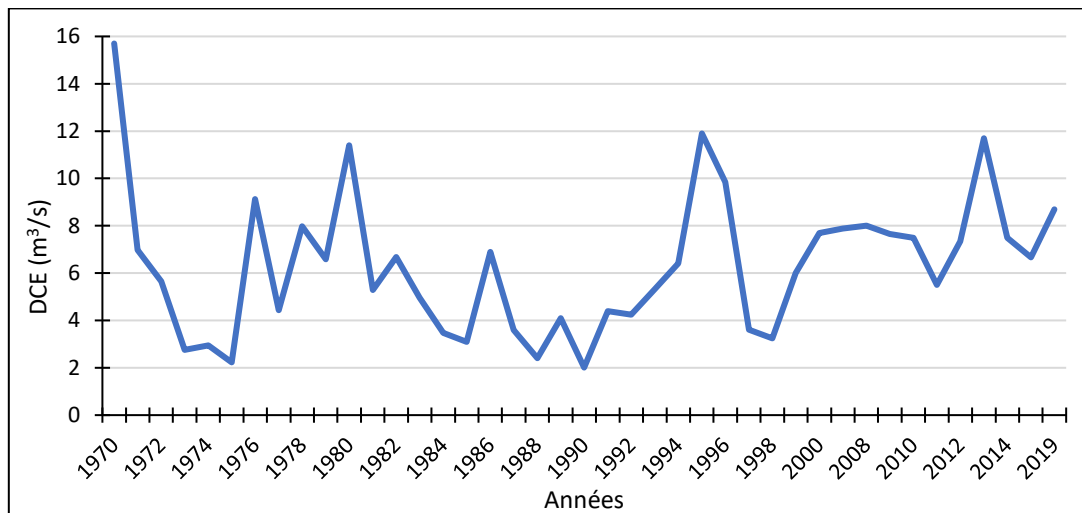


Figure 62 : Évolution des débits caractéristiques d'étiage à la station de Sorotona sur la période 1970-2020.

7.2.4.2. Débits moyens mensuels minimums annuels (QMNA)

La figure 63 présente l'évolution des débits moyens mensuels minimums annuels dans le bassin versant. Le graphe de la figure, montre une instabilité hydrologique des écoulements sur la période d'étude. Les écoulements mensuels les plus faibles sont observés sur la période 1988-1992 traduisant le déficit hydrologique de ces années. On observe également des pics d'écoulement atteints en 1970 (23,1 m³/s) et en 1995 (17,7 m³/s). L'analyse du graphe fait remarquer une hausse progressive des QMNA sur les deux dernières décennies de la période d'étude (2000-2020).

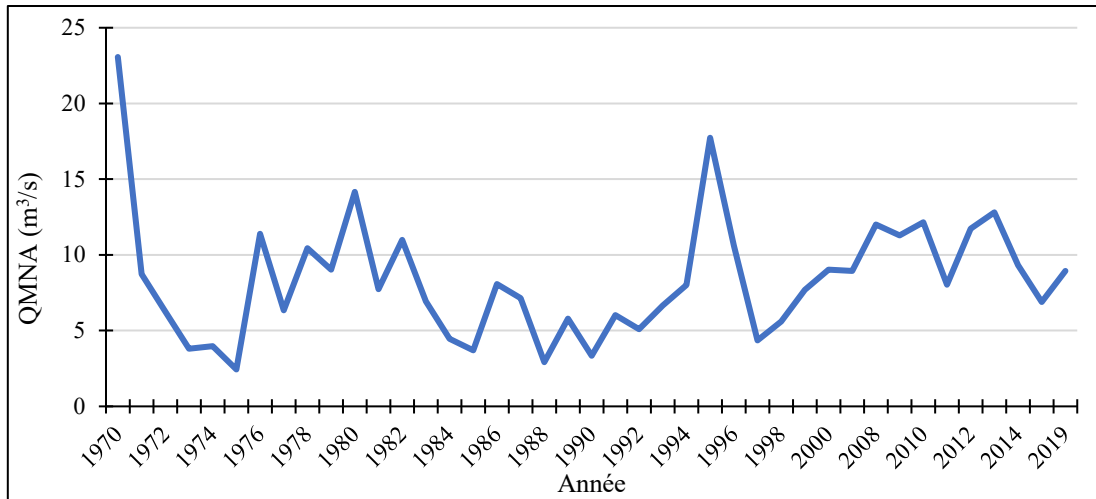


Figure 63 : Évolution des débits moyens mensuels minimaux annuels (QMNA) à la station de Sorotona sur la période 1970-2020.

7.2.4.3. Indice de sévérité des étiages (ISE) dans le bassin versant

L'évolution des indices de sévérité d'étiage est présentée à la figure 64. La première observation des valeurs de l'ISE révèle que la sévérité est principalement liée à l'aspect hydraulique, c'est-à-dire les écoulements. Les faibles indices de sévérité enregistrés dans le bassin versant datent des années 1975, 1985, 1988, 1997 et 1998. La gravité des étiages à ces périodes semble très marquée étant donné les valeurs respectives avec des intensités de 2,5 ; 2,8 ; 2,7 ; 3,3 ; 3,6. Les autres valeurs de l'indice de sévérité mettent en lumière l'importance du soutien des réservoirs souterrains et de l'alimentation pluviale dans le bassin versant du Sassandra à Sorotona.

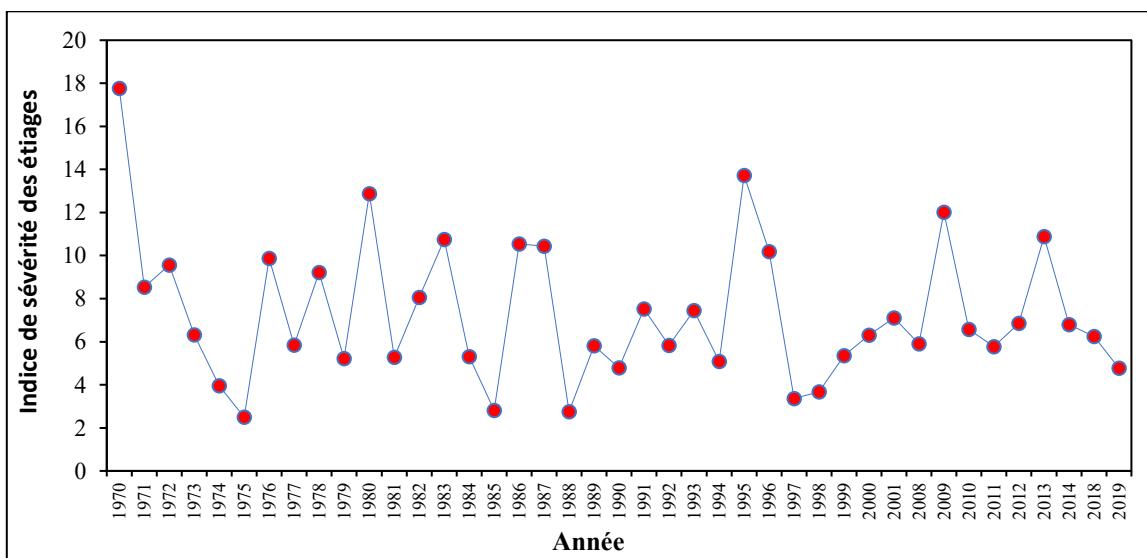


Figure 64 : Évolution des indices de sévérité d'étiage à la station de Sorotona sur la période 1970-2020

7.2.4.4. Débits moyens minimums journaliers (VCN_d)

La figure 65 présente l'évolution des débits moyens minimums journaliers dans le bassin versant. L'analyse des graphes de la figure permet de suivre l'évolution des débits moyens minimums journaliers consécutifs sur 3 ; 5 ; 7 et 10 jours ou débits journaliers à date fixe. Cette analyse, porte sur les mois de basses eaux (janvier à avril) de chaque année de la période d'étude (1970-2020). En effet, de janvier à avril, les écoulements sont faibles et critiques pour les usages de l'eau dans le bassin versant. Le suivi des VCN₃, VCN₅, VCN₇ et VCN₁₀, indique que les graphes décrivent une cuvette où les valeurs du fond désignent les écoulements critiques du cycle hydrologique. Les VCN dans leur ensemble varient entre 9 m³/s et 32,5 m³/s. Les mois de janvier et février qui enregistrent respectivement les débits de Q₃ à Q₃₁ et Q₃₂ à Q₅₉, montrent une baisse progressive et rapide des écoulements passant de 29,6 à 12,9 m³/s pour les VCN_{3,5,7} et de 23,8 à 10,8 m³/s pour VCN₁₀. Pendant cette période (janvier à février), les volumes d'eau écoulés pourraient être suffisants pour la satisfaction des besoins dans le bassin versant. La courbe montre que le mois de mars (Q₆₀ à Q₉₀) est le plus critique de l'année hydrologique avec des valeurs qui varient entre 13,2 et 12,5 m³/s pour les VCN_{3,5,7} et entre 9 m³/s et 10,6 m³/s pour VCN₁₀. Dans ce mois de mars, les écoulements enregistrent les valeurs critiques (faibles) des séries. La sévérité de l'étiage pendant cette période est remarquable parce que les volumes mobilisés d'eau peinent à satisfaire les besoins hydriques et à assurer les activités biologiques du cours d'eau. Après le mois de mars, les volumes écoulés se reconstituent progressivement avec les pluies isolées du mois d'avril pour atteindre des débits de 30 m³/s pour toutes les durées fixées.

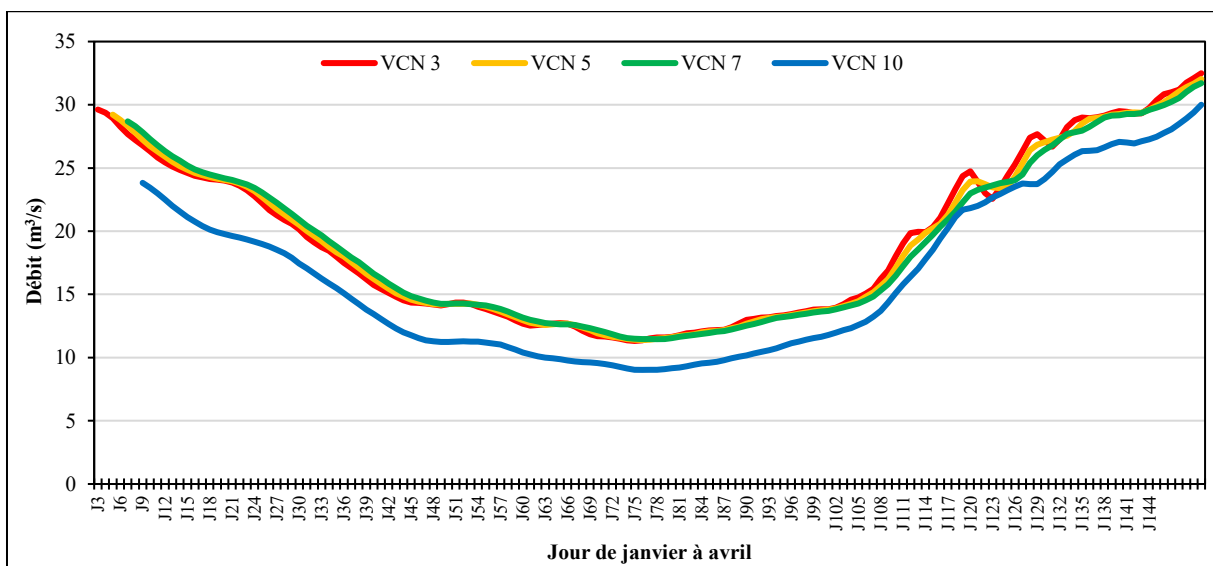


Figure 65 : Évolution des débits moyens minimums journaliers (VCN_d) à la station de Sorotona sur la période 1970-2020.

7.2.4.5. Durée des étiages

Dans le paragraphe 6.2.1, le traitement des débits journaliers montre les variations des minimas de débits sur n jours consécutifs. Ces variations caractérisent toutefois des débits d'étiage moyens sur des périodes de n jours, mais ne traduisent pas la durée des étiages. Pour pallier cette insuffisance, la durée de l'étiage est appréciée à partir des débits inférieurs à un seuil fixé dans notre étude. La définition du seuil des étiages a pris en considération le DCE ($7,1 \text{ m}^3/\text{s}$), partant de la courbe des débits journaliers classés sur la période d'étude. Le débit caractéristique d'étiage (DCE) correspond au débit journalier dépassé dans 97,3 %. Les seuils retenus pour le suivi de la durée des étiages sont : $3 \text{ m}^3/\text{s}$; $5 \text{ m}^3/\text{s}$ et $7 \text{ m}^3/\text{s}$. La figure 66 présente une représentation graphique des durées d'étiage à partir des seuils. Les graphes indiquent les pics de durée des étiages en 1974 ; 1984 ; 1987 et 1989. Pour le seuil de $3 \text{ m}^3/\text{s}$, les durées des étiages sont respectivement de 10, 4, 19 et 29 jours par an correspondant aux années citées ci-dessus. Quant au seuil de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, les durées sont de 53, 61, 69 et 71 jours étiages pas an. Enfin, pour le seuil de $7 \text{ m}^3/\text{s}$, les durées d'étiage connaissent une augmentation non négligeable de 98, 101, 102 et 96 jours de faibles débits par année. Ensuite, l'analyse fait ressortir des durées courtes d'étiage enregistrées sur les deux dernières décennies. A l'exception du seuil de $3 \text{ m}^3/\text{s}$, les autres seuils n'enregistrent pas de durées d'étiages depuis 2000.

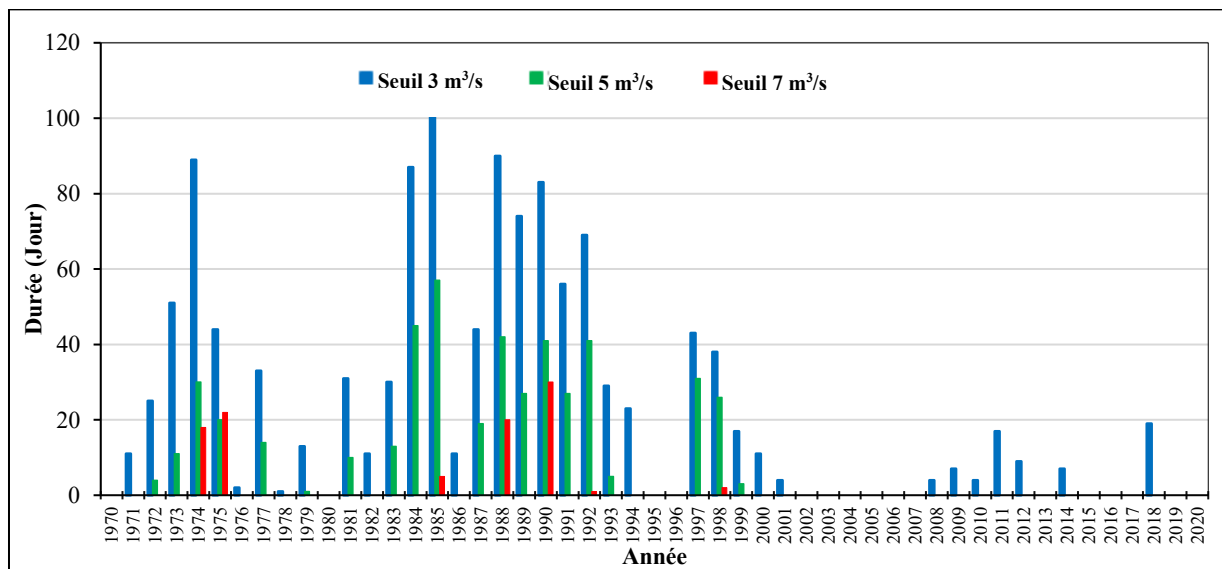


Figure 66 : Évolution de la durée des débits d'étiage dans le bassin versant sur la période 1970-2020.

7.3. Modélisation des écoulements d'eau futurs dans le bassin versant

L'occupation du sol ayant une influence sur les écoulements dans le bassin versant, les résultats de l'étude de sa dynamique sont présentés. Ensuite les cartes d'occupation du sol futures de

2034 et 2054 produites par le modèle Land Change Modeler (LCM) ont servi de support pour la simulation des écoulements futurs aux horizons 2040 et 2060 dans le bassin versant.

7.3.1. Évaluation de la précision d'élaboration des cartes d'occupation du sol

Le tableau XXV présente la matrice de confusion de la classification de l'image de 1986. Il ressort de l'analyse du tableau que des confusions sont observées entre les différentes classes d'occupation du sol lors de la classification supervisée. La principale confusion est celle entre les sols nus et les cultures qui est estimée à 12,99%. La classe eau est la mieux classée car elle ne présente aucune erreur de commission et d'omission (100%). Alors que les autres classes présentent des erreurs de commission et d'omission faibles (inférieure à 5%). La confusion observée entre ces classes est certainement liée à la période de prise de l'image qui est la saison sèche. Les confusions entre les différentes classes d'occupation du sol dans le bassin versant en cette année sont à la base de l'indice de Kappa de 95 % et l'indice d'exactitude de 0,96. L'indice de Kappa montre que le niveau de fiabilité de la classification est bon.

Tableau XXV : Matrice de confusion de la classification de l'image de 1986

| Classes d'occupation du Sol | Sols nus | Forêt | Eau | Cultures | Zones humides | Habitats | Savane |
|-----------------------------|----------|-------|-----|----------------------------|---------------|----------|--------|
| Sols nus | 85,88 | 0 | 0 | 1,65 | 1,08 | 0,56 | 0 |
| Forêt | 0 | 98,27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,73 |
| Eau | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 2,68 |
| Cultures | 12,99 | 0 | 0 | 94,81 | 1,08 | 0,37 | 0,77 |
| Zones humides | 0 | 0,03 | 0 | 0 | 95,7 | 0 | 0,05 |
| Habitats | 0 | 0 | 0 | 3,54 | 0 | 99,07 | 0 |
| Savane | 1,13 | 1,69 | 0 | 0 | 2,15 | 0 | 93,76 |
| Total | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | | | | Indice Kappa | 0,95 | | |
| | | | | Indice d'exactitude | 0,96 | | |

Le tableau XXVI présente la matrice de confusion issue de la classification de l'image de 2003. Il ressort que l'indice de Kappa est égal à 0,82 et l'indice d'exactitude de la classification est de 0,74. On constate à partir de l'analyse du tableau des confusions au niveau de certaines classes d'occupation du sol. En effet, les cultures se confondent à plusieurs classes d'occupation du sol, notamment des sols nus (32,78%), à la savane (16,5%). Ces taux d'erreur de confusion donnent une assez médiocre classification de la classe cultures.

Par contre, la confusion entre la classe cultures et les classes savane et sols nus peut s'expliquer par le fait que certaines mosaïques de cultures ont des réflectances similaires à celles de la savane. C'est le cas des plantations de canne à sucre et d'anacarde. Une autre confusion est

constatée entre la savane et les classes de sols nus et cultures. Cette confusion est la réciproque de la précédente, mais à des proportions différentes. Les autres classes sont les mieux classifiées avec moins de 5% d'erreur d'omission de façon générale. De tout ce qui précède, on peut conclure que la classification des images de l'année 2003 est acceptable.

Tableau XXVI : Matrice de confusion de la classification de l'image de 2003

| Classe d'occupation du sol | Sols nus | Forêt | Eau | Cultures | Zones humides | Habitats | Savane | Total |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------|--------------|--------------|-------|
| Sols nus | 96,92 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,15 | 15,01 | 27,48 |
| Forêt | 0 | 96,94 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6,4 | 35,57 |
| Eau | 0 | 0,1 | 92,86 | 0 | 8,6 | 0 | 3,97 | 2,11 |
| Cultures | 0 | 0,92 | 2,38 | 82,31 | 5,38 | 5,02 | 13,05 | 9,12 |
| Zones humides | 0 | 0 | 0 | 1,18 | 86,02 | 0 | 0 | 0,08 |
| Habitats | 3,08 | 0 | 0 | 0 | 0 | 92,83 | 0 | 17,51 |
| Savane | 0 | 2,04 | 4,76 | 16,51 | 0 | 0 | 61,58 | 8,13 |
| Total | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Indice Kappa 0,82 | | | | | | | | |
| Indice d'exactitude 0,74 | | | | | | | | |

La matrice de confusion de l'image Landsat de l'année 2020 est présentée au tableau XXVII. L'analyse de ce tableau montre qu'il y a des confusions entre plusieurs classes d'occupation du sol. En effet, les confusions les plus importantes lors de cette classification sont observées entre les classes cultures et savane et entre les cultures toujours et les sols nus. Ces confusions sont exprimées à des proportions respectives de 19,36% et 20,63%. La confusion entre les cultures et la savane est due au fait que les cultures et les savanes présentent les mêmes signatures spectrales. Quant à la savane et aux sols nus, la principale source de confusion émane du fait que pendant les mois secs, la végétation herbeuse perd toute sa teneur en chlorophylle et prend la couleur brune. Cette couleur a une très forte ressemblance avec les sols nus au passage des capteurs Landsat. La confusion entre les sols nus et les habitats, estimée à 9,44% demeure le schéma classique des systèmes de mutations des types d'occupation des sols dans les régions. La classe zones humides est la mieux classifiée avec aucune erreur de confusion et d'omission (86%). Globalement les classes forêts, eau et habitats sont mieux classifiées avec des erreurs d'omission faibles (comprises entre 0 et 2%).

Tableau XXVII : Matrice de confusion de la classification de l'image de 2020

| Classe d'occupation du Sol | Sols nus | Forêt | Eau | Cultures | Zones humides | Habitats | Savane | Total |
|----------------------------|----------|-------|-------|----------|---------------|----------|--------|-------|
| Sols nus | 87,55 | 0 | 0 | 19,36 | 0 | 1,19 | 20,63 | 17,48 |
| Forêt | 0 | 96,73 | 10,29 | 0,01 | 0 | 0 | 0 | 5,39 |
| Eau | 0 | 0,82 | 84 | 0,05 | 0 | 0 | 6,72 | 3,21 |
| Cultures | 1,29 | 1,14 | 0 | 56,44 | 0 | 0,92 | 3,83 | 40,57 |
| Zones humides | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0,33 |
| Habitats | 9,44 | 0 | 0 | 7,1 | 0 | 97,89 | 0 | 14,36 |
| Savane | 1,72 | 1,31 | 5,71 | 17,04 | 0 | 0 | 68,81 | 18,67 |
| Total | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Indice Kappa **0,84**

Indice d'exactitude **0,75**

7.3.2. Occupation du sol dans le bassin versant en 1986

La figure 67 présente la carte d'occupation du sol du bassin versant en 1986. Le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona en 1986 était occupé par sept (7) classes d'occupation du sol. Il s'agit de la classe forêt, savane, cultures, eau, zones humides, sols nus et enfin habitats.

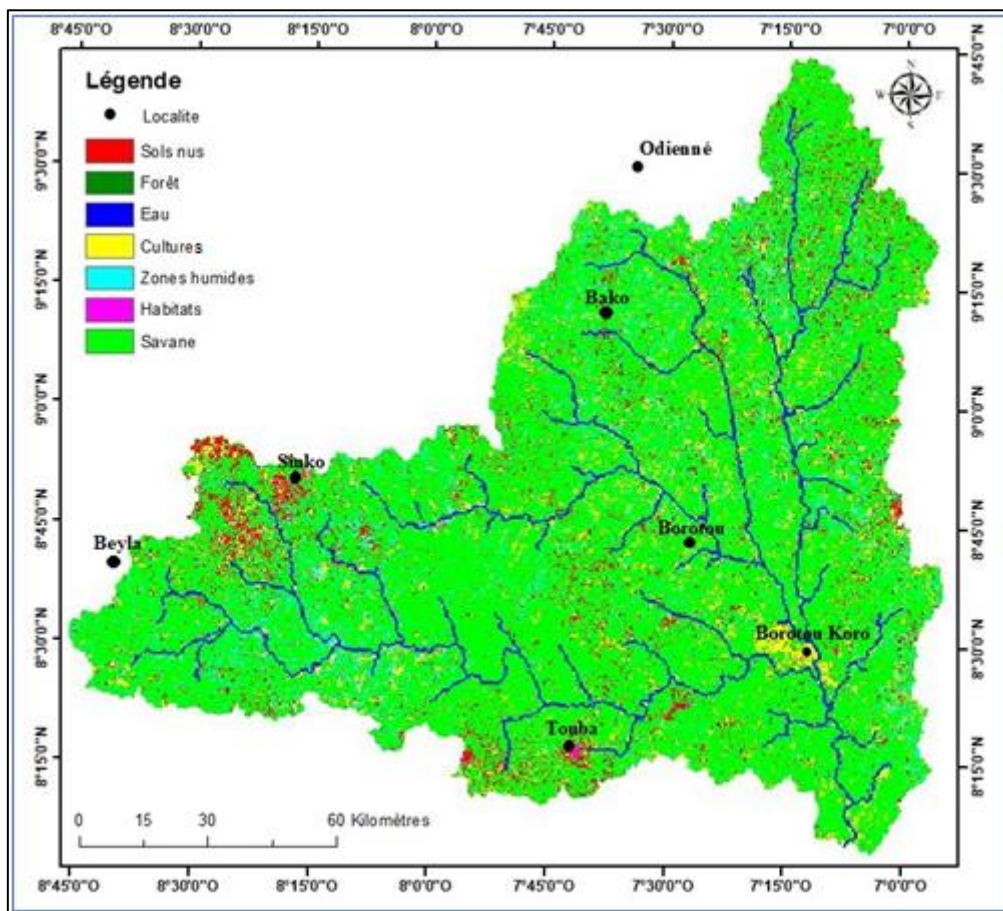


Figure 67 : Carte d'occupation du sol du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona en 1986

Les superficies des différentes classes d'occupation du sol de l'année 1986 sont présentées dans le tableau XXVIII.

Tableau XXVIII : Superficie des classes d'occupation du sol du bassin versant en 1986

| N° | Classe d'occupation du sol | Superficie (ha) | Pourcentage (%) |
|--------------|----------------------------|------------------|-----------------|
| 1 | Sols nus | 87 513 | 4,70 |
| 2 | Forêt | 216 580 | 11,65 |
| 3 | Eau | 63 809 | 3,43 |
| 4 | Cultures | 385 688 | 20,75 |
| 5 | Zones humides | 138 952 | 7,47 |
| 6 | Habitats | 21 445 | 1,15 |
| 7 | Savane | 944 113 | 50,81 |
| Total | | 1 858 100 | 100 |

On constate, que la végétation savanicole occupe près de la moitié du bassin versant. Elle couvrait 944 113 ha soit 50,81% de la superficie totale du secteur d'étude. L'agriculture qui était la principale activité des populations n'occupe que 385 688 ha (20,75%). Quant à la forêt, qui est généralement localisée en bordure des cours d'eau, elle occupe 11,65% soit 216 580 ha du bassin versant.

Enfin, les autres classes d'occupation du sol que sont les sols nus, les habitats, les zones humides et l'eau occupent respectivement 4,70%, 1,15%, 7,47% et 3,43% de couverture de la zone d'étude. La figure 68 illustre la représentation graphique des classes d'occupation du sol dans le bassin versant en 1986.

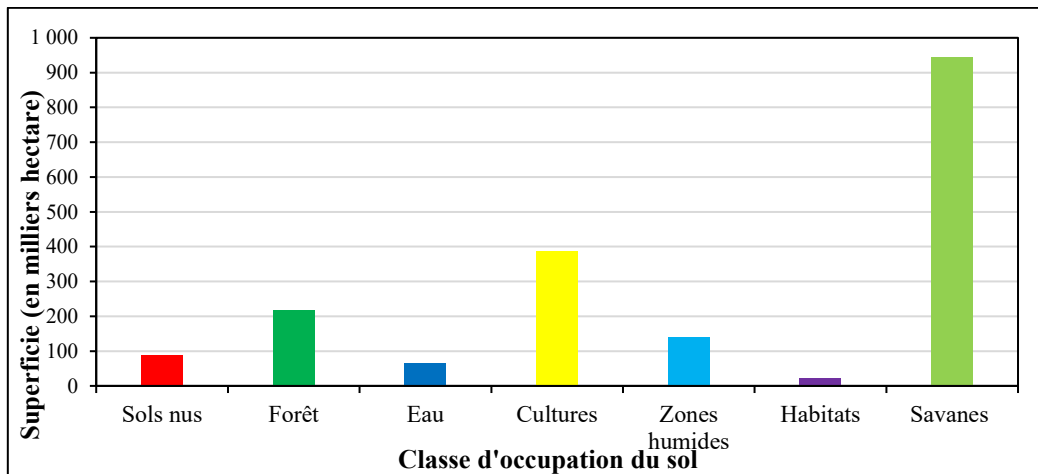


Figure 68 : Répartition des classes d'occupation du sol du bassin versant en 1986

7.3.3. Occupation du sol dans le bassin versant en 2003

La carte d'occupation du sol en 2003 présentée à la figure 69, est différente de celle de 1986 du point de vue de l'étendue des superficies des classes.

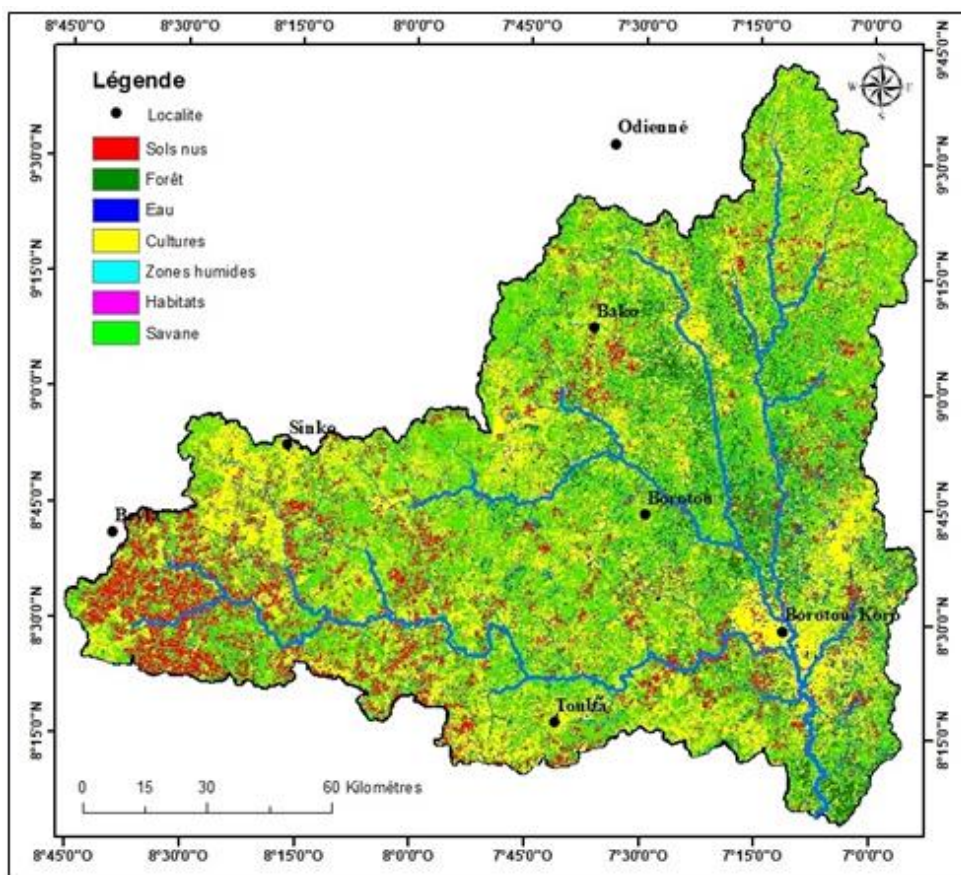


Figure 69 : Carte d'occupation du sol du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona en 2003
 L'analyse de la carte d'occupation de 2003, montre une prédominance de la végétation savanicole avec la présence quelquefois de forêt dans la partie Centre-Ouest de la zone d'étude. Les superficies des classes d'occupation sont présentées dans le tableau XXIX.

Tableau XXIX : Superficie des classes d'occupation du sol du bassin versant en 2003

| N | Classe d'occupation du sol | Superficie (ha) | Pourcentage (%) |
|--------------|----------------------------|------------------|-----------------|
| 1 | Sols nus | 201 490 | 10,84 |
| 2 | Forêt | 126 463 | 6,80 |
| 3 | Eau | 60 185 | 3,24 |
| 4 | Cultures | 544 447 | 29,28 |
| 5 | Zones humides | 15 717 | 0,85 |
| 6 | Habitats | 21 930 | 1,18 |
| 7 | Savane | 888 868 | 47,81 |
| Total | | 1 858 100 | 100 |

L'analyse de la figure 70 montre qu'en 2003, les superficies couvertes par la savane, la forêt et les zones humides ont connu une régression en passant respectivement à 888 946 ha, 126 463 ha et 15 717 ha. Les cultures et les sols nus ont connu une augmentation de leurs superficies. Ainsi, en 2003, la superficie des cultures a atteint 544 447 ha soit 29,28% et les sols nus 201 490 ha soit 10,84% de couverture dans le bassin versant. Quant aux surfaces couvertes par l'eau

et les habitats, leurs superficies restent inchangées entre les années 1986 et 2003 avec des valeurs de 60 185 et 21 930 ha.

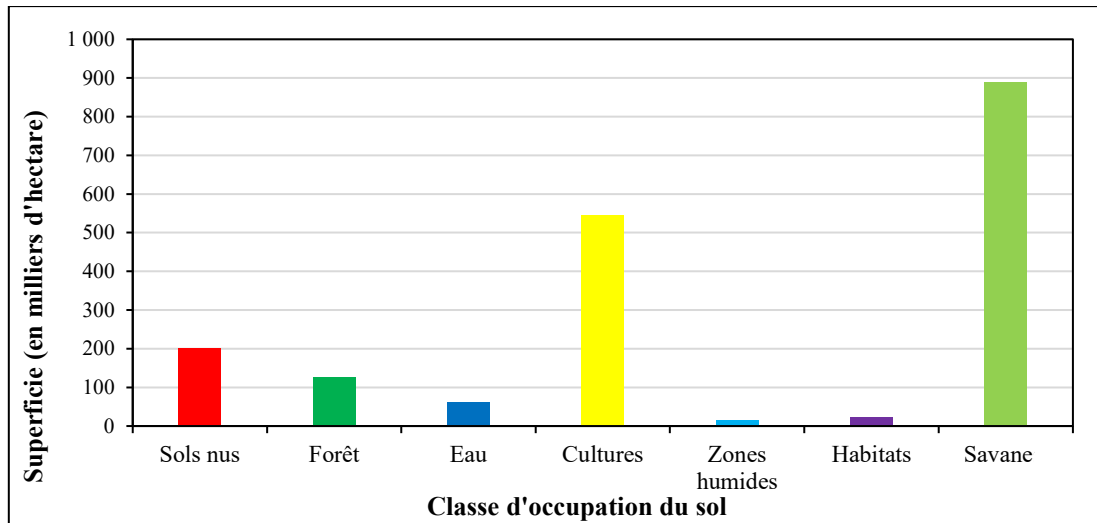


Figure 70 : Répartition des classes d'occupation du sol du bassin versant en 2003

7.3.4. Occupation du sol dans le bassin versant en 2020

A l'instar des années 1986 et 2003, on remarque en 2020 une variation des superficies des classes d'occupation du sol comme illustré par la figure 71.

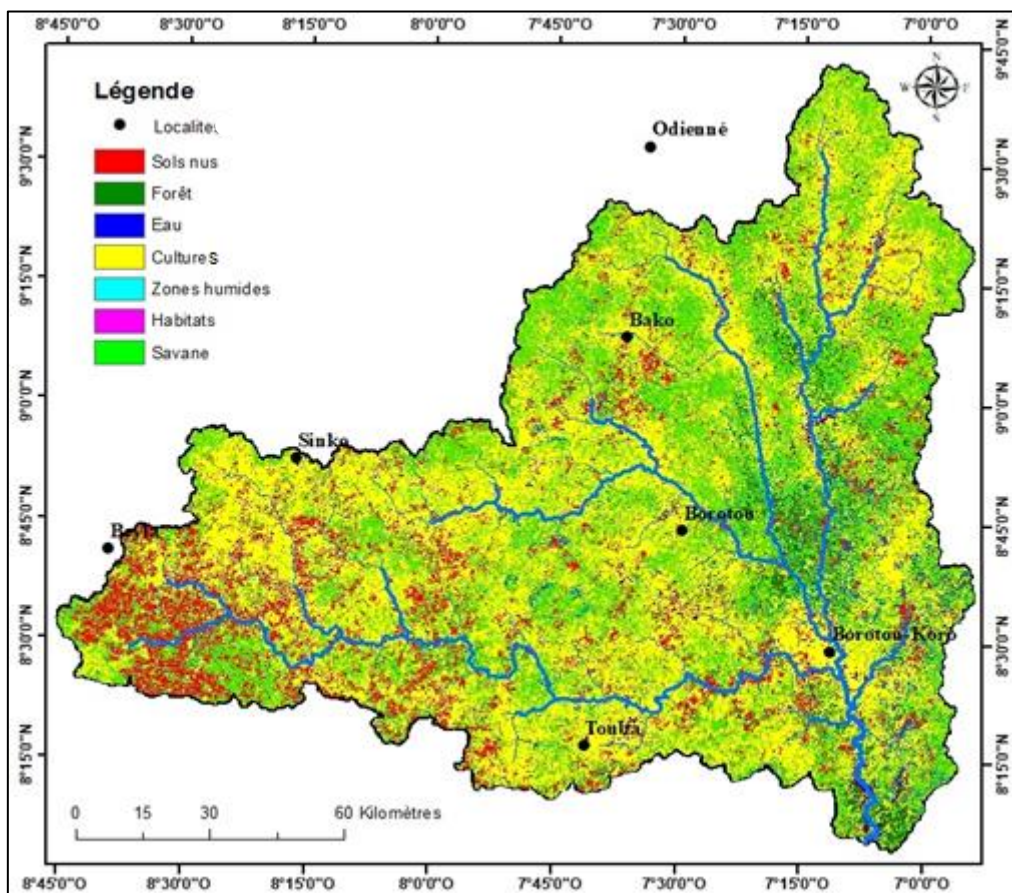


Figure 71 : Carte d'occupation du sol du bassin versant en 2020.

La figure montre une densification de la classe cultures sur toute la surface du bassin versant. Par contre, on remarque dans le même temps une disparition des zones humides. Les superficies des classes d'occupation du sol identifiées sont présentées dans le tableau XXX.

Tableau XXX: Superficie des classes d'occupation du sol du bassin versant en 2020

| N | Classes d'occupation du sol | Superficie (ha) | Pourcentage (%) |
|--------------|-----------------------------|------------------|-----------------|
| 1 | Sols nus | 208 041 | 11,20 |
| 2 | Forêt | 39 244 | 2,11 |
| 3 | Eau | 46 126 | 2,48 |
| 4 | Cultures | 900 221 | 48,45 |
| 5 | Zones humides | 327 | 0,02 |
| 6 | Habitats | 43 268 | 2,33 |
| 7 | Savane | 620 873 | 33,42 |
| Total | | 1 858 100 | 100 |

L'analyse de la figure 72 montre que l'occupation du sol est largement dominée par les cultures qui couvrent 48,45% (900 221 ha) du bassin versant. Ensuite, la savane et les sols nus couvrent respectivement 620 873 ha (33,4%) et 208 041 ha (11,2%) de superficie. La forêt, l'eau et les zones humides cumulent des pertes considérables de leurs surfaces et de leurs étendues. La forêt couvre désormais 39 244 ha (2,11%), l'eau 46 126 ha (2,48%) et enfin les zones humides 327 ha (0,02%). Du côté des habitats, on observe une nette augmentation avec 43 268 ha soit 2,33% de surface couverte.

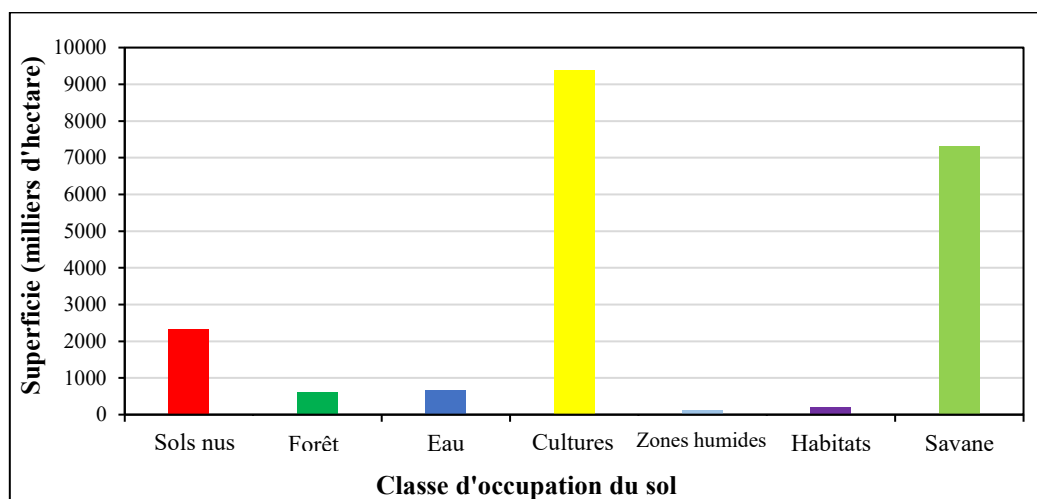


Figure 72 : Répartition des classes d'occupation du sol du bassin versant en 2020

7.3.5. Dynamique des classes d'occupation du sol dans le bassin versant

7.3.5.1. Dynamique de l'occupation du sol entre 1986 et 2003

Les écarts entre les superficies de chaque catégorie d'occupation du sol entre 1986 et 2003 donnent une indication du changement intervenu dans le bassin versant. Ainsi, les superficies des classes d'occupation du sol ont évolué comme l'indique le tableau XXXI. L'analyse du tableau montre que les classes forêt, eau, zones humides et savane ont connu une régression de

leurs superficies. Les taux de régression sont respectivement -41,6%, -5,7%, -88,7% et -5,9% pour les classes forêt, eau, zones humides et savane.

Par contre, les sols nus, les cultures et les habitats ont vu une progression de leurs superficies respectivement de 130,2%, 41,2% et 2,3%. Les taux moyens annuels d'expansion varient entre -12,8% et 4,9% en fonction des étendues de surface converties et selon le type d'évolution (régression ou accroissement). Entre 1986 et 2003, la classe cultures a augmenté de 9338,8 ha par année suivie de la classe sols nus (6704,5 ha/an). A l'opposé, les vitesses de réduction des surfaces de forêt, d'eau, de zones humides et de savane sont estimées respectivement à -5301,0 (ha/an), -2113,2 (ha/an), -7249,1 (ha/an) et -3249,6 (ha/an).

Tableau XXXI : Taux et vitesses de variation des superficies des classes d'OCS du bassin versant entre 1986 et 2003

| Classes d'occupation du sol | Superficie en 1986 (ha) | Superficie en 2003 (ha) | Taux de variation (%) | Taux moyen annuel d'expansion (%) | Vitesse Moyenne variation (ha/an) |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Sols nus | 87 513 | 201 490 | 130,2 | 4,9 | 6704,5 |
| Forêt | 216 580 | 126 463 | -41,6 | -3,2 | -5301,0 |
| Eau | 63 809 | 60 185 | -5,7 | -0,3 | -2113,2 |
| Cultures | 385 688 | 544 447 | 41,2 | 2,0 | 9338,8 |
| Zones humides | 138 952 | 15 717 | -88,7 | -12,8 | -7249,1 |
| Habitats | 21 445 | 21 930 | 2,3 | 0,1 | 28,5 |
| Savane | 944 113 | 888 868 | -5,9 | -0,4 | -3249,6 |

7.3.5.1.1. Cartographie des changements d'occupation du sol entre 1986 et 2003

Les différents changements de classes d'occupation de sol observés entre 1986 et 2003 ont été cartographiés à la figure 73. Cette dernière montre quinze (15) grands types de transition (changements de classes) majeurs. Au cours de cette période, une partie du milieu est restée apparemment stable. Tous les changements mineurs (superficie inférieure à 10 ha) d'occupation du sol n'ont pas été matérialisés.

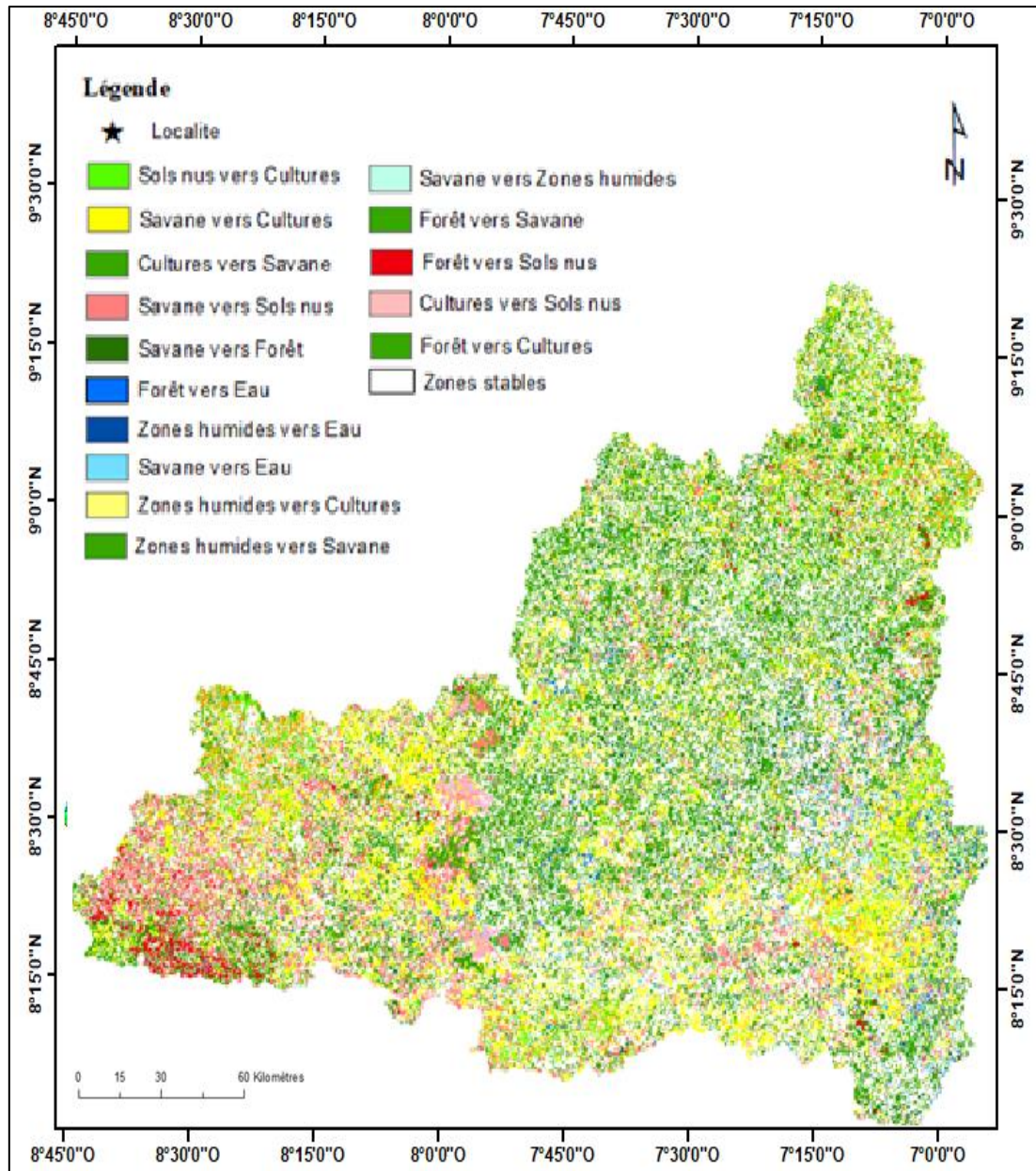


Figure 73: Carte des changements d’occupation du sol du bassin versant entre 1986-2003

7.3.5.1.2. Matrice de transition de l’occupation du sol entre 1986 et 2003

La matrice des changements générée par le croisement des cartes d’occupation du sol de 1986 et 2003 du bassin versant est présentée par le tableau XXXII. Cette matrice montre les différents changements opérés au niveau de chaque classe d’occupation du sol. L’analyse du tableau permet de constater qu’entre 1986 et 2003, la zone d’étude a été sujette à de nombreuses mutations. De façon globale, trois types de changement ont été observés : la régression, la progression et la stabilité. La régression entre 1986 et 2003 a le plus affecté les classes forêt, savane et zones humides. Ainsi, 73 769,3 ha de forêt ont été transformés en savane, 42 597,1 ha en cultures et 492,7 ha en sols nus. Quant à la savane, 332144,6 ha ont été converties en culture, 126 546,1 ha en sols nus du fait de la sécheresse et 2916,1 ha en habitation. Enfin, la

troisième classe la plus affectée est la classe des zones humides. 11681,9 ha de cette classe ont été transformés en savane, 7782,6 ha en zone de cultures et 377,7 ha en sols nus. En dépit des pertes de surfaces observées pour certaines classes, des gains ont été observés dans d'autres classes. C'est le cas des classes sols nus (196184,8 ha), cultures (370662,7 ha) et par moment savane (437858,0 ha). Les classes d'occupation du sol telles que l'eau et les habitats ont connu de légères augmentations qu'on pourra qualifier de stabilité.

Tableau XXXII : Matrice de transition entre 1986 et 2003 en hectare

| T1 | | OCS 1986 | | | | | | | | |
|-----------------|---------|---------------|----------------|---------------|----------------|----------------|--------------|----------------|------------------|----------|
| T2 | | SN | F | E | C | ZH | H | S | Total 2 | Gain |
| OCS 2003 | SN | 87 417 | 492,7 | 0,0 | 0,0 | 377,7 | 0,0 | 126546,1 | 211 490 | 196184,8 |
| | F | 0,0 | 98 985 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 126 462 | 44512,8 |
| | E | 0,0 | 0,0 | 63 396 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 60 185 | 59023,6 |
| | C | 0,0 | 42 597 | 0,0 | 377 953 | 7782,6 | 0,0 | 332144,6 | 544 447 | 370662,7 |
| | ZH | 0,0 | 735,3 | 412,4 | 0,0 | 119 109 | 0,0 | 0,0 | 15 717 | 14418,1 |
| | H | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2893 | 2916,1 | 10 930 | 8036,6 |
| | S | 95,3 | 73769,3 | 0,0 | 7734,5 | 11681,9 | 0,0 | 482 583 | 88 8945 | 437858 |
| | Total 1 | 87 513 | 21 6580 | 63 809 | 385 688 | 138 952 | 2 893 | 944 190 | 1 839 625 | |
| Perte | 95,3 | 117594,4 | 412,4 | 7734,5 | 19842,1 | 0,0 | 461606,8 | | | |

Légende : SN : Sols Nus ; F : Forêt ; E : Eau ; C : Cultures ; ZH : Zones humides ; H : Habitats ; S : Savane.

7.3.5.2. Dynamique de l'occupation du sol entre 2003 et 2020

Les taux et les vitesses d'évolution de la dynamique de l'occupation du sol sont présentés dans le tableau XXXIII. L'analyse de ce tableau montre qu'entre 2003 et 2020, les superficies des classes d'occupation du sol ont évolué. Elles ont régressé pour certaines et augmenté pour d'autres. Ceci traduit la dynamique d'occupation du sol que connaît le bassin versant. Les superficies des classes d'occupation du sol en régression continuent toujours de régresser. Les superficies de forêt, eau, zones humides et savane ont beaucoup diminué entre 2003 et 2020 avec des taux respectifs de régression de -69 %, -23,4 %, -97,9 et -30,1 % et corrélés aux taux annuels d'expansion respectif de -6,9 %, 1,6 %, -22,8 % et -2, %. La classe zones humides a été la plus affectée avec la disparition de ses superficies. Par contre, les sols nus, les cultures et les habitats ont vu leurs superficies progressées avec des taux respectifs de 3,3 %, 65,3 % et 97,3 % et des taux moyens annuels d'expansion respectivement de 0,2 %, 3 % et 40 %. Entre 2003 et 2020, la classe habitats a doublé, ce qui traduit une forte urbanisation du bassin versant. Enfin, les sols nus sont restés relativement stables avec une légère augmentation. Durant la période de 2003 à 2020, la classe de cultures a connu un accroissement de 20 927,9 ha par année. Cette valeur est la plus élevée de toutes les transformations dans le bassin versant. Hormis cela, les vitesses de régression sont estimées à -5130,5 ha/an pour la forêt, -827,0 ha/an pour les surfaces occupées par l'eau, -905,3 ha/an pour les zones humides et -15 764,5 ha/an

pour la savane. Quant aux vitesses de progression, elles sont de 385,4 ha/an pour les sols nus, 1255,2 ha/an pour la classe habitats et 20 927,9 ha/an pour les cultures.

Tableau XXXIII : Taux et vitesses d'évolution des superficies entre 2003 et 2020

| Classes d'occupation du sol | Superficie en 2003 (ha) | Superficie en 2020 (ha) | Taux de variation (%) | Taux moyen annuel d'expansion (%) | Vitesse moyenne évolution (ha/an) |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Sols nus | 201 490 | 208 041 | 3,3 | 0,2 | 385,4 |
| Forêt | 126 463 | 39 244 | -69,0 | -6,9 | -5130,5 |
| Eau | 60 185 | 46 126 | -23,4 | -1,6 | -827,0 |
| Cultures | 544 447 | 900 221 | 65,3 | 3,0 | 20927,9 |
| Zones humides | 15 717 | 327 | -97,9 | -22,8 | -905,3 |
| Habitats | 21 930 | 43 268 | 97,3 | 4,0 | 1255,2 |
| Savane | 888 946 | 620 950 | -30,1 | -2,1 | -15764,5 |

7.3.5.2.1. Cartographie des changements d'occupation du sol entre 2003 et 2020

La figure 74 présente les transitions de changement d'occupation du sol entre 2003 et 2020. A l'instar de la période 1986-2003, la carte de la période 2003-2020 révèle vingt-trois (23) grandes transitions et des zones stables. Les différentes transitions sont les régressions et progressions. Trois ordres de régression ont été identifiés dans ces changements et deux ordres de progression.

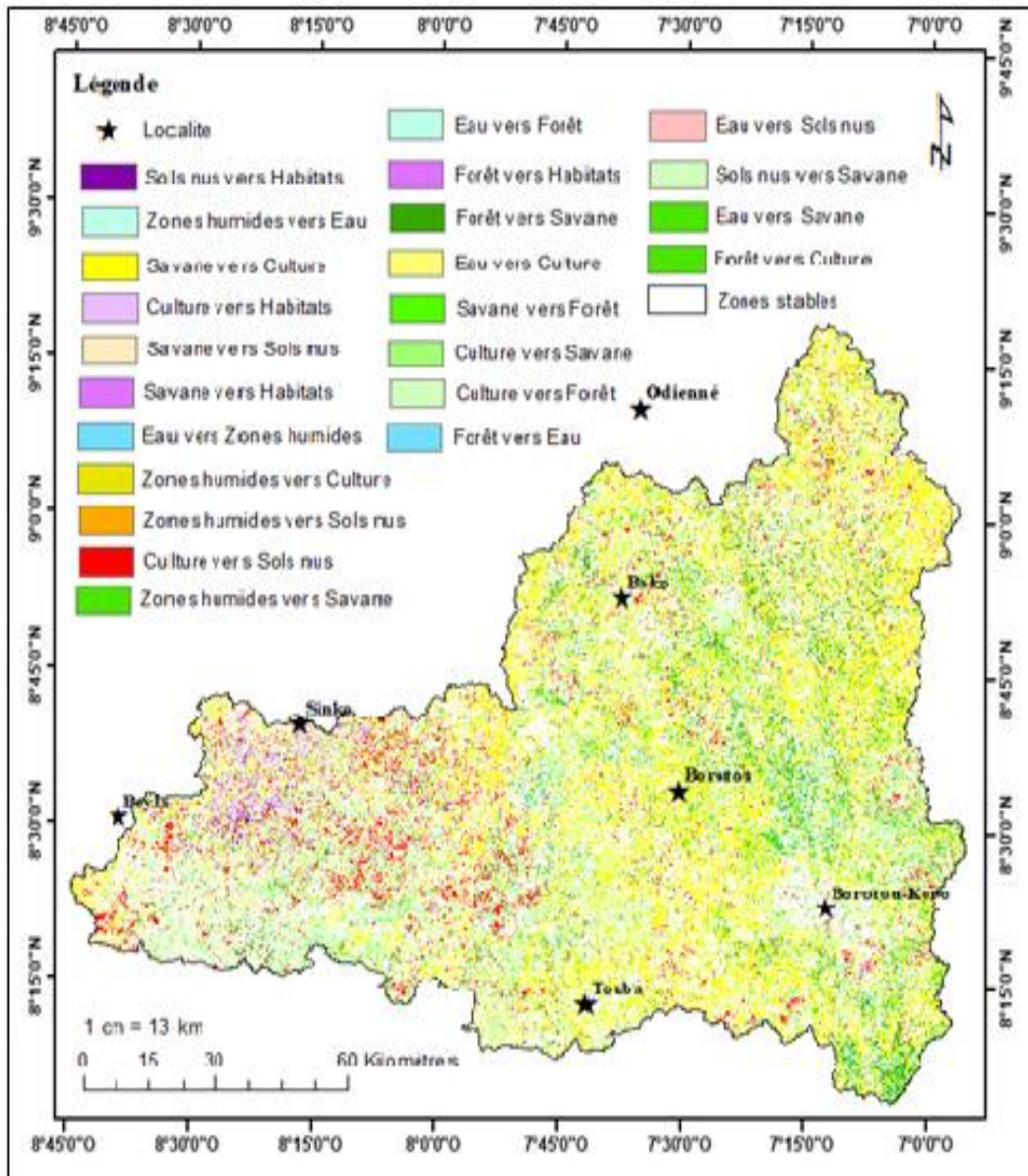


Figure 74: Carte des changements d'occupation du sol du bassin versant entre 2003 et 2020

7.3.5.2.2. Matrice de transition de l'occupation du sol entre 2003 et 2020

La matrice de transition de l'occupation du sol entre 2003 et 2020 est présentée par le tableau XXXIV. La superposition des cartes d'occupation du sol de 2003 et 2020 a permis d'obtenir la matrice de transition. Cette matrice montre les différents changements opérés au niveau de chaque classe d'occupation du sol pendant la période. Il ressort de l'analyse du tableau qu'entre 2003 et 2020, 997,7 ha de sols nus se sont transformés en habitats. Quant aux forêts, 206,8 ha sont transformés en sols nus, 4790,5 ha en cultures et 7607,2 ha en savane. Les surfaces occupées par l'eau sont transformées en sols nus (913,0 ha), en cultures (2460,3 ha) et en zones humides (14,5 ha). En plus, 65909,3 ha de cultures sont transformés en sols nus et 126 180 ha en savane. En ce qui concerne les zones humides, 1057 ha sont transformés en sols nus et 2977,9 ha en culture et 515,1 ha sont converties en savane. Selon la matrice de transition, la classe

habitats n'a subi aucune transformation. Enfin, 6259 ha de savane sont transformés en sols nus, 310,4 ha en forêt et 129537,3 ha en culture. Les zones humides et habitats ont bénéficié des augmentations de superficie respectives de 271,5 ha et 839,6 ha entre 2003 et 2020.

Tableau XXXIV : Matrice de transition entre 2003 et 2020 en hectare

| T1 | | OCS 2003 | | | | | | | Total 2 | Gain |
|--------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|---------------|---------------|----------------|------------------|---------------|
| T2 | SN | F | E | C | ZH | H | S | | | |
| OCS 2020 | SN | 200 486 | 206,8 | 913,0 | 65909,3 | 1057,0 | 0,0 | 6259,0 | 274 831 | 74345 |
| | F | 0,0 | 113 849 | 0,0 | 7,0 | 0,0 | 0,0 | 310,4 | 114 667 | 817,4 |
| | E | 0,0 | 0,0 | 56 797 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 56 797 | 0,0 |
| | C | 0,0 | 4790,5 | 2460,3 | 351 827 | 2977,9 | 0,0 | 129537 | 491 593 | 1397 |
| | ZH | 6,1 | 9,0 | 14,5 | 23,2 | 11 167 | 0,1 | 271,5 | 11 491 | 324,5 |
| | H | 997,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 21 930 | 839,6 | 23 767 | 1837,3 |
| | S | 0,0 | 7607,2 | 0,0 | 126180 | 515,1 | 0,0 | 751 728 | 886 030 | 134302 |
| | Total 1 | 201490 | 126 463 | 60 185 | 544 447 | 15 717 | 21 930 | 888 946 | 1 859 178 | |
| Perte | 1003,8 | 12613,4 | 3387,8 | 192619 | 4550,0 | 0,1 | 137217 | | | |

Légende : SN : Sols nus ; F : Forêt ; E : Eau ; C : Cultures ; ZH : Zones humides ; H : Habitats ; S : Savane.

7.3.5.3. Dynamique de l'occupation du sol entre 1986 et 2020

La figure 75 montre la tendance générale d'évolution des classes d'occupation du sol entre 1986 et 2020. L'analyse de la figure, montre que les cultures sont la seule classe qui a augmenté de façon considérable et régulière. Entre 1986 et 2003, elles ont gagné 158 759 ha et 355 774 ha entre 2003 et 2020. Ces gains de superficies sont issus de toutes les autres classes d'occupation du sol. Il en est de même pour les habitats qui ont gagné une superficie totale de 21 823 ha entre 1986 et 2020. Quant à la régression, les forêts et les zones humides sont les plus affectées. Ces classes d'occupation du sol ont perdu de leurs superficies sur la période d'étude. 177 336 ha de forêt et 138 625 ha de zones humides ont été convertis en d'autres classes d'occupation du sol. Les surfaces occupées par l'eau et les habitats varient très peu entre 1986 et 2020. Ces classes d'occupation du sol sont dites stables.

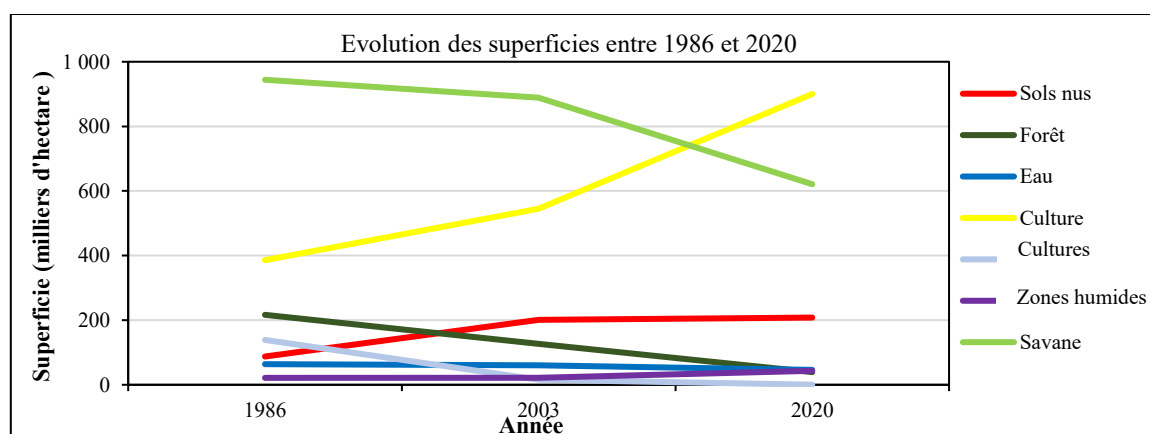


Figure 75: Evolution des superficies des classes d'occupation du sol entre 1986 et 2020

7.3.5.4. Variation du taux moyen annuel d'expansion entre 1986 et 2020

Le tableau XXXV, permet de suivre la variation du taux moyen annuel d'expansion entre 1986 et 2020. L'analyse du tableau montre que la forêt et la savane ont connu une régression au cours des deux périodes. Les taux de régression annuelle sont moins élevés au cours de la période 1986-2003 qu'au cours de celle de 2003 à 2020. Ainsi, ces formations végétales naturelles ont régressé annuellement de (-3,20) à (-6,90 %) et de (-0,40) à (-2,1 %) respectivement dans le bassin versant. La classe forêt a régressé de -5% et la savane de -1,2% avec des vitesses respectives de -5215,8 ha/an et -9507,1 ha/an. Les surfaces occupées par l'eau et les zones humides ont subi également des pertes. La classe eau a régressé globalement de -1 % soit une vitesse de -520,1 ha/an et les zones humides de -17,8 %, soit -4077,2 ha/an. Les classes sols nus, cultures et habitats ont connu un gain de superficie au détriment des autres classes en régression. Les classes cultures et habitats sont passées d'un taux expansion annuel de 2% entre 1986 et 2003 à 3% entre 2003 et 2020 et de 0,1% entre 1986 et 2003 à 4% entre 2003 et 2020, avec une vitesse globale respective de 15133,3 ha/an et 641,9 ha/an. Quant aux sols nus, leurs expansions ont été réduites entre 2003 et 2020. On note également que le taux d'expansion annuelle de sols nus est passé de 4,9% entre 1986 et 2003 à 0,2% entre 2003 et 2020 avec une vitesse annuelle de 3544,9 ha/an.

Tableau XXXV: Taux et vitesses d'évolution des superficies des classes d'occupation du sol dans le bassin versant entre 1986 et 2020

| Classes d'occupation du sol | Superficie (ha) 1986 | Superficie (ha) 2003 | Superficie (ha) 2020 | Taux moyen annuel d'expansion (1986-2003) (%) | Taux moyen annuel d'expansion (2003-2020) (%) | Taux moyen annuel d'expansion (%) | Vitesse moyenne évolution (ha/an) |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Sols nus | 87 513 | 201 490 | 208 041 | 4,9 | 0,2 | 2,5 | 3544,9 |
| Forêt | 216 580 | 126 463 | 39 244 | -3,2 | -6,9 | -5,0 | -5215,8 |
| Eau | 63 809 | 60 185 | 46 126 | -0,3 | -1,6 | -1,0 | -520,1 |
| Cultures | 385 688 | 544 447 | 900 221 | 2,0 | 3,0 | 2,5 | 15133,3 |
| Zones humides | 138 952 | 15 717 | 327 | -12,8 | -22,8 | -17,8 | -4077,2 |
| Habitats | 21 445 | 21 930 | 43 268 | 0,1 | 4,0 | 2,1 | 641,9 |
| Savane | 944 190 | 888 946 | 620 950 | -0,4 | -2,1 | -1,2 | -9507,1 |

7.4. Prédiction de l'occupation du sol dans le bassin versant avec le module Land Change Modeler (LCM)

7.4.1. Analyse des changements

La figure 76 présente les changements globaux de l'occupation du sol sur la période 1986-2003 dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona. Elle montre que la plupart des catégories d'occupation du sol ont des gains et des pertes. C'est le cas des cultures et des sols nus qui ont

progressé tandis que les zones humides et la forêt ont perdu de leurs superficies. Par contre, la savane, les plans d'eau et les habitations restent stables.

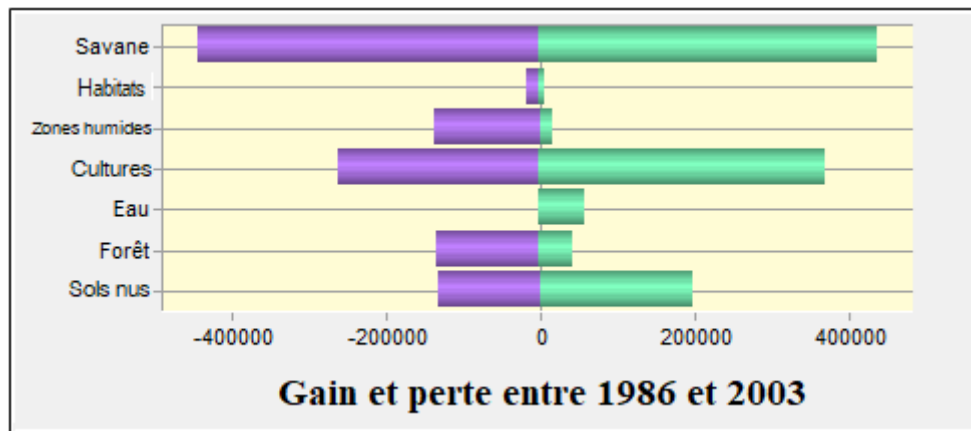


Figure 76 : Gains et pertes des superficies d'occupation du sol sur le bassin versant entre 1986 et 2003

Les contributions nettes de chaque classe d'occupation du sol sont présentées à la figure 77. Les superficies de forêt et de zones humides montrent de fortes diminutions. Cette diminution s'est faite essentiellement au détriment des cultures, des habitats et des sols nus. L'accroissement des superficies de cultures est expliqué par une montée en puissance des cultures de rente favorisées par la forte migration humaine dans la zone.

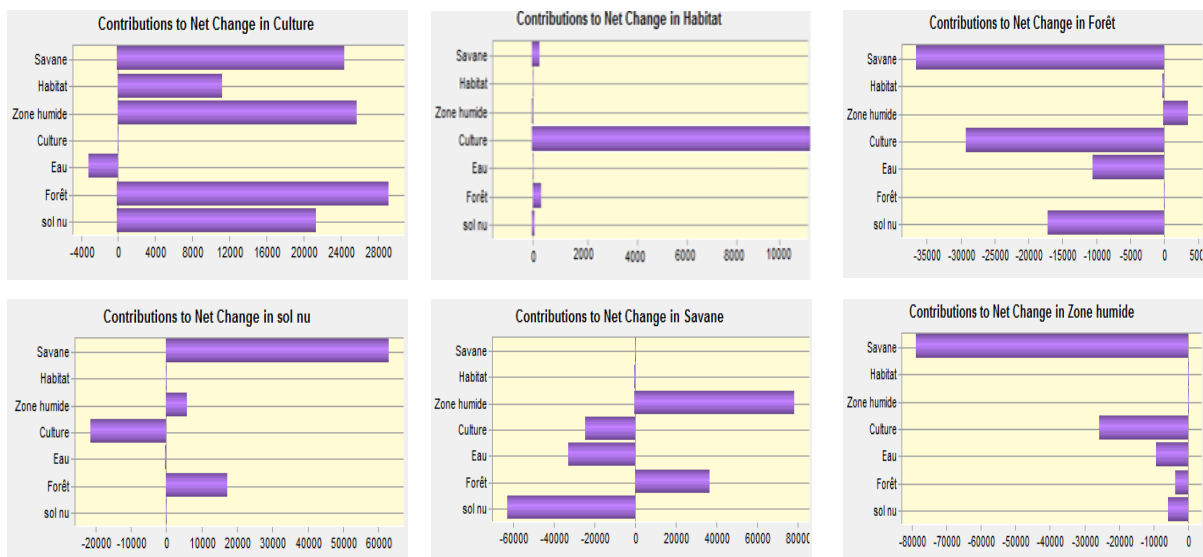


Figure 77 : Contributions du changement net des catégories de l'occupation des sols

7.4.2. Variables explicatives des changements observés

Le tableau XXXVI présente les coefficients V de Cramer obtenus par le perceptron multicouches (MLP) lors du test explanatory power. Pour rendre le modèle de simulation dynamique en deux pas d'intervalle de 17 ans (2034 et 2054), certaines variables ont été rendues

dynamiques. On indique à chaque fois en ajoutant les variables à LCM, si elles sont statiques ou dynamiques.

Tableau XXXVI: Coefficients de Cramer’s V des variables explicatives

| Variables explicatives | Classes d’occupation du sol | | | | | | | Valeur Globale | Rôles |
|------------------------|-----------------------------|-------|-------|----------|---------------|----------|--------|----------------|---------|
| | Sols nus | Forêt | Eau | Cultures | Zones humides | Habitats | Savane | | |
| Altitude | 0,00 | 0,143 | 0,106 | 0,0508 | 0,1770 | 0,0235 | 0,0394 | 0,0774 | Static |
| Pente | 0,00 | 0,039 | 0,034 | 0,0155 | 0,0220 | 0,0320 | 0,0176 | 0,0551 | Static |
| Localités | 0,00 | 0,051 | 0,046 | 0,0372 | 0,0720 | 0,0423 | 0,0534 | 0,0467 | Dynamic |
| Routes | 0,00 | 0,051 | 0,047 | 0,0372 | 0,0720 | 0,0423 | 0,0534 | 0,0467 | Dynamic |
| Hydrographie | 0,00 | 0,014 | 0,039 | 0,0206 | 0,0223 | 0,0109 | 0,0089 | 0,0228 | Static |

Les variables statiques ne changent pas au fil du temps. Par contre, celles dites dynamiques sont temporellement dépendantes et sont recalculées à chaque itération au cours de l’entraînement et de la simulation. Les variables telles que l’altitude, la pente et l’hydrographie ont été considérées comme statiques. Les variables dynamiques sont les agglomérations et les routes, parce que le réseau routier et les agglomérations ont connu de grands changements au cours de la période d’étude. L’ensemble des variables utilisés pour la modélisation de l’occupation du sol sont présentés par la figure 78.

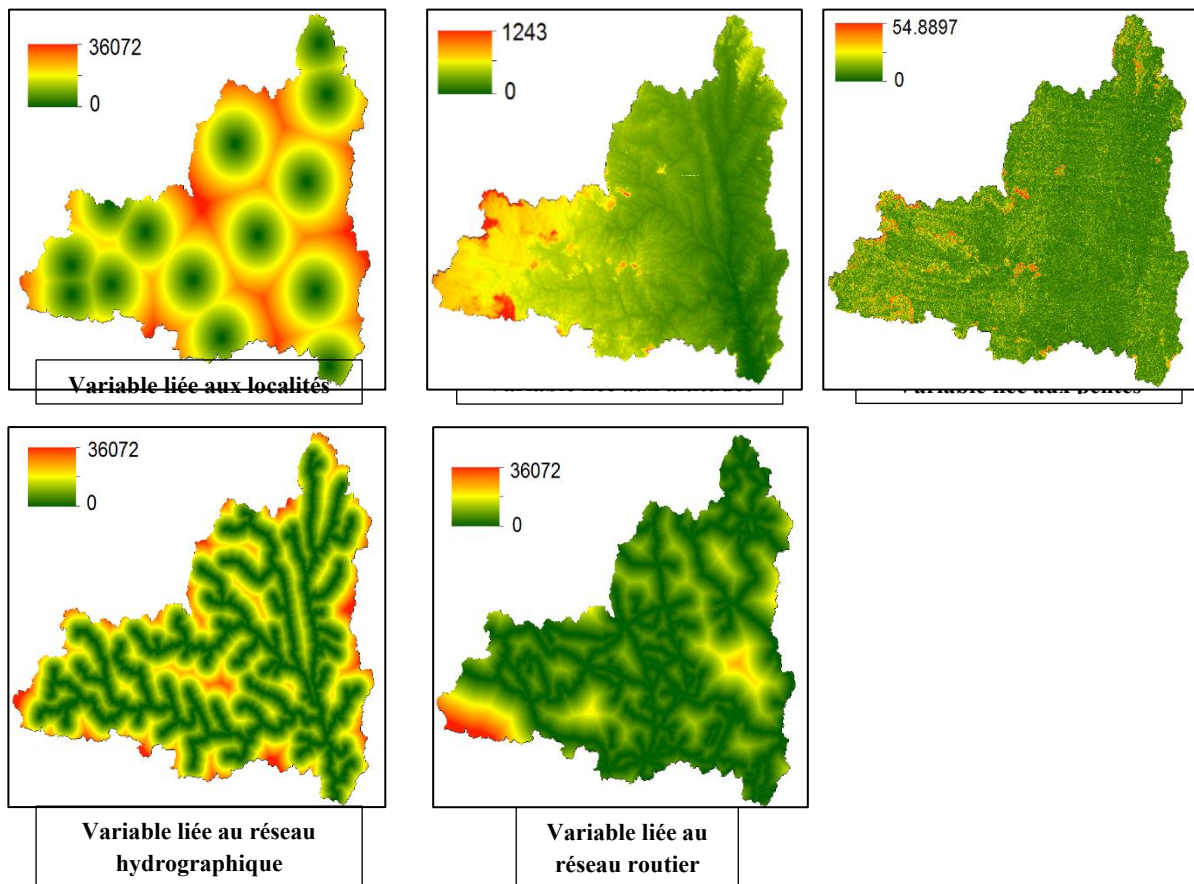


Figure 78 : Variables explicatives utilisées pour la modélisation du sol dans le bassin versant.

7.4.3. Modélisation du potentiel de transition

7.4.3.1. Choix des transitions et sous-modèle de modélisation

Le tableau XXXVII présente les sous modèles de transitions entre 1986 et 2003. On remarque entre 1986 et 2003, un nombre important de transitions a été observé (38). Seules les transitions vers les catégories d’occupation du sol anthropiques ont été retenues et consignées dans le tableau.

Tableau XXXVII : Sous modèles et leurs transitions potentiels retenus

| Sous modèle | Transitions considérées |
|-----------------------------|--|
| Cultures | Forêt vers cultures ; Eau vers cultures ; Savane vers cultures |
| Habitats et sols nus | Forêt vers habitats ; Savane vers habitats ; Zones humides vers habitats ; Zones humides vers sols nus |

7.4.3.2. Potentiel de transition

Grace à la combinaison de la carte de transition (1986-2003) aux variables explicatives de ces changements, des cartes de potentiel de transition sont générées (Figure 79). Les différentes cartes de potentiel de transition, correspondent à des transitions retenues dans cette étude.

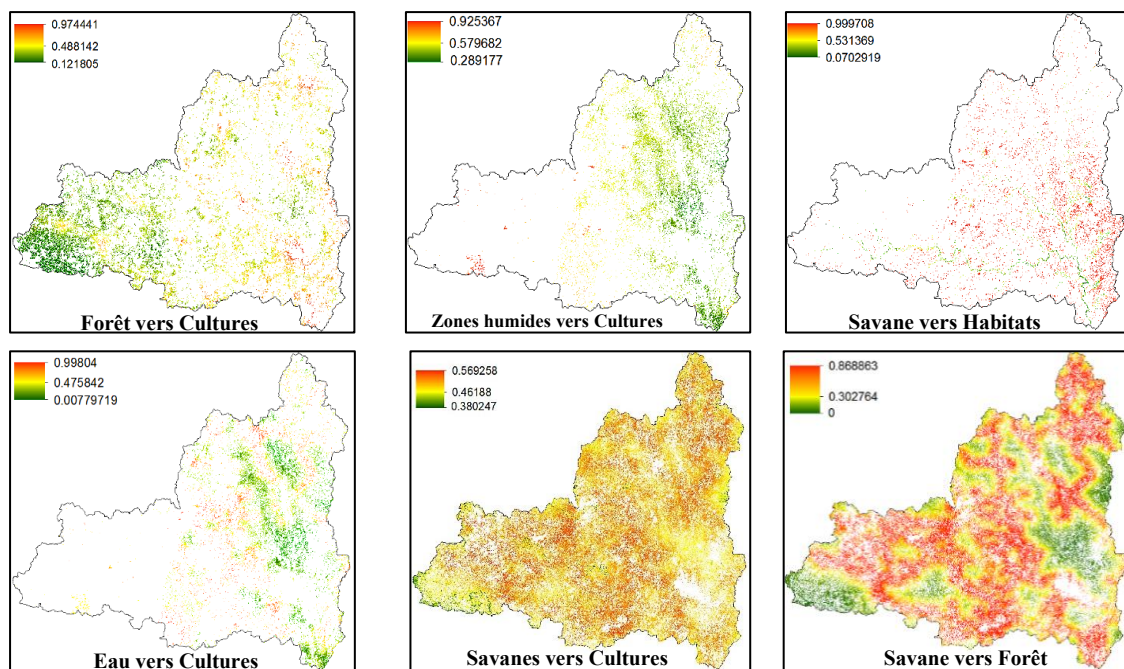


Figure 79 : Cartes des potentiels de transition vers les classes de cultures, d’habitats et forêt.

Le tableau XXXVIII exprime, pour chaque pixel, leur probabilité graduelle d’occurrence sur une échelle continue de 0 à 1. Seulement ces cartes mettent en exergue les zones potentiellement soumises à des changements. Elles expriment donc une probabilité pour chaque type de

changement modélisé. Chacune des cartes de potentiel de transition a été évaluée par le taux d'exactitude (Accuracy rate). Ce taux permet de valider les cartes et de voir à quel degré elles coïncident avec la dynamique observée en partant sur la base des cartes d'occupation du sol de 1986. Ainsi, plus le taux d'exactitude est élevé, plus l'observation devrait tendre vers la présence de la catégorie considérée.

Tableau XXXVIII : Taux d'exactitude des cartes de potentiel de transition pour chaque type de transition par sous-modèle

| Sous modèle | Transition considérée | Taux d'exactitude (Accuracy rate) % |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| Cultures | Forêt vers cultures | 88,54 |
| | Eau vers cultures | 82,37 |
| | Savane vers cultures | 92,32 |
| | Zones humides vers cultures | 79,92 |
| Habitats et sols nus | Forêt vers habitats | 75,24 |
| | Savane vers habitats | 72,02 |
| | Zones humides vers habitats | 89,73 |

7.4.4. Validation du modèle Land Change Modeler

Les cartes d'occupation du sol observée et simulée par le modèle LCM sur la base des différentes données d'entrée sont présentées à la figure 80. Les résultats de la modélisation montrent que la carte simulée pour l'année 2020 est raisonnablement similaire à celle observée. Une grande partie de la forêt et de la savane a été convertie en zone de cultures principalement. Le modèle a tendance à surestimer les classes habitats et cultures et sous-estimer les autres classes. Il faut préciser que les superficies occupées par les ressources en eau restent relativement stables dans le temps.

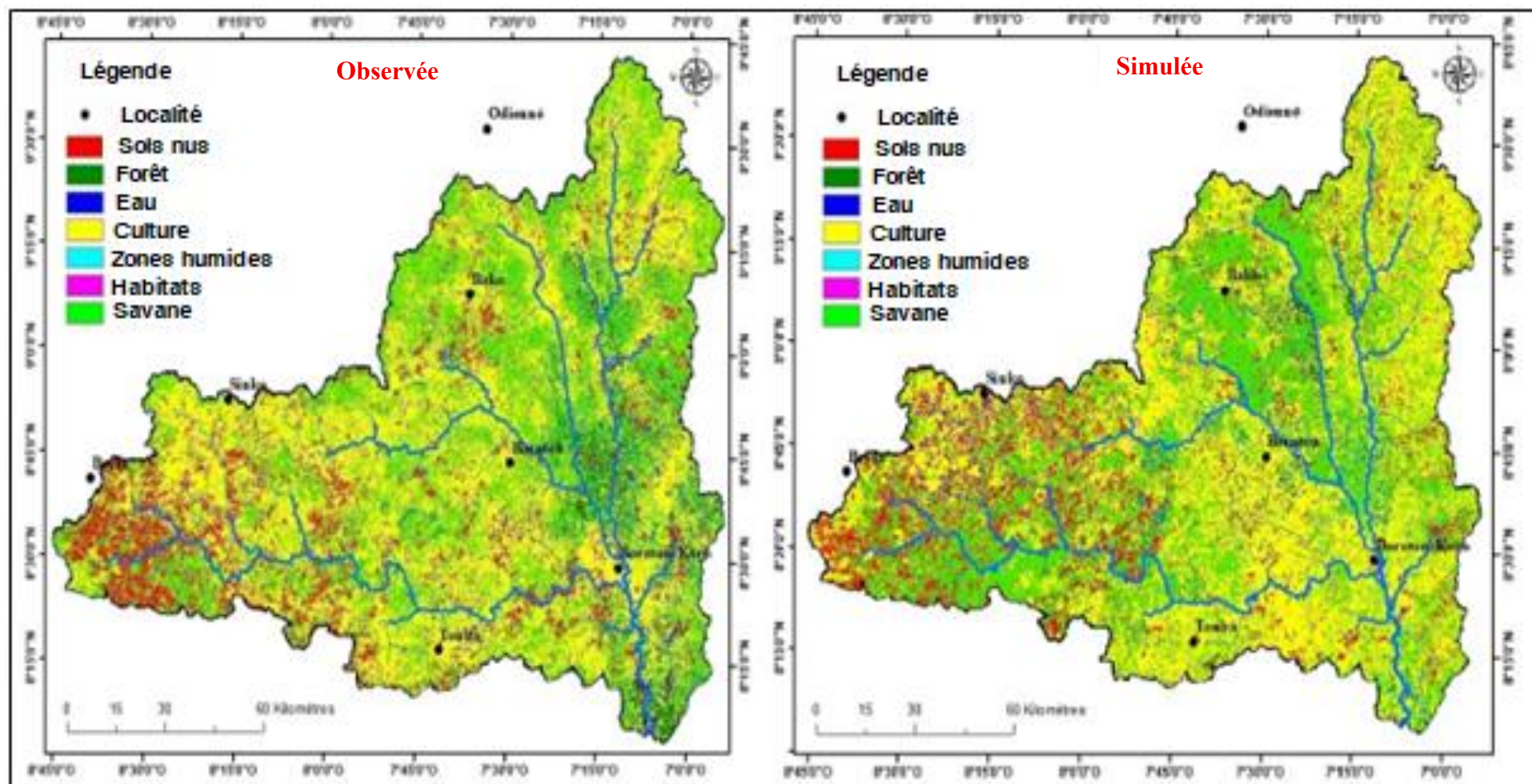


Figure 80 : Comparaison entre la carte d'occupation du sol observée (a) et la carte simulée (b) pour l'année 2020.

Les résultats des différentes classes d'occupation du sol pour les cartes observée et simulée pour l'année 2020 donnent plus de précision sur les superficies de chaque classe (Tableau XXXIX). La carte simulée sous-estime la superficie des cultures (900 221,3 ha observé contre 845 780,3 ha simulé) et celle des habitats de 17 713,7 ha sur la carte simulée contre 43 268,8 ha sur la carte observée. Quant aux autres classes d'occupation du sol du bassin versant, on constate une surestimation par rapport à la carte observée. Il s'agit de 209 629,2 ha pour les superficies simulées contre 208 040,6 ha de superficies observées pour la classe sols nus. Pour la classe forêt, on constate 54 872,1 ha simulés contre 39 244,6 ha observés. Le modèle surestime aussi les classes occupées par l'eau et les zones humides. D'une façon générale, le modèle surestime les classes d'occupation du sol dans leur ensemble dans le bassin versant.

Tableau XXXIX : Superficie des différentes classes d'occupation du sol observées et simulées en 2020

| | Superficie observée (ha) | Superficie simulée (ha) | Différence | |
|----------------------|--------------------------|-------------------------|------------|-----------------|
| Sols nus | 208 040,6 | 209 629,2 | 1 588,5 | |
| Forêt | 39 244,6 | 54 872,1 | 15 627,5 | Surestimation |
| Eau | 46 126,8 | 60 185,5 | 14 058,7 | |
| Cultures | 900 221,3 | 845 780,3 | -54 441,0 | Sous-estimation |
| Zones humides | 327,1 | 11 744,2 | 11 417,1 | Surestimation |
| Habitats | 43 268,8 | 17 713,7 | -25 555,1 | Sous-estimation |
| Savane | 620 950,1 | 658 254,3 | 37 304,1 | Surestimation |

7.4.5. Simulation des cartes d'occupation du sol aux horizons futurs

La figure 81 présente les cartes d'occupation du sol simulées en 2034 (Figure 81a) et 2054 (Figure 81b). Après la validation du modèle, les cartes d'occupation du sol ont été réalisées. Ces cartes montrent des tendances à la baisse et à la hausse des différentes classes d'occupation du sol aux files des années.

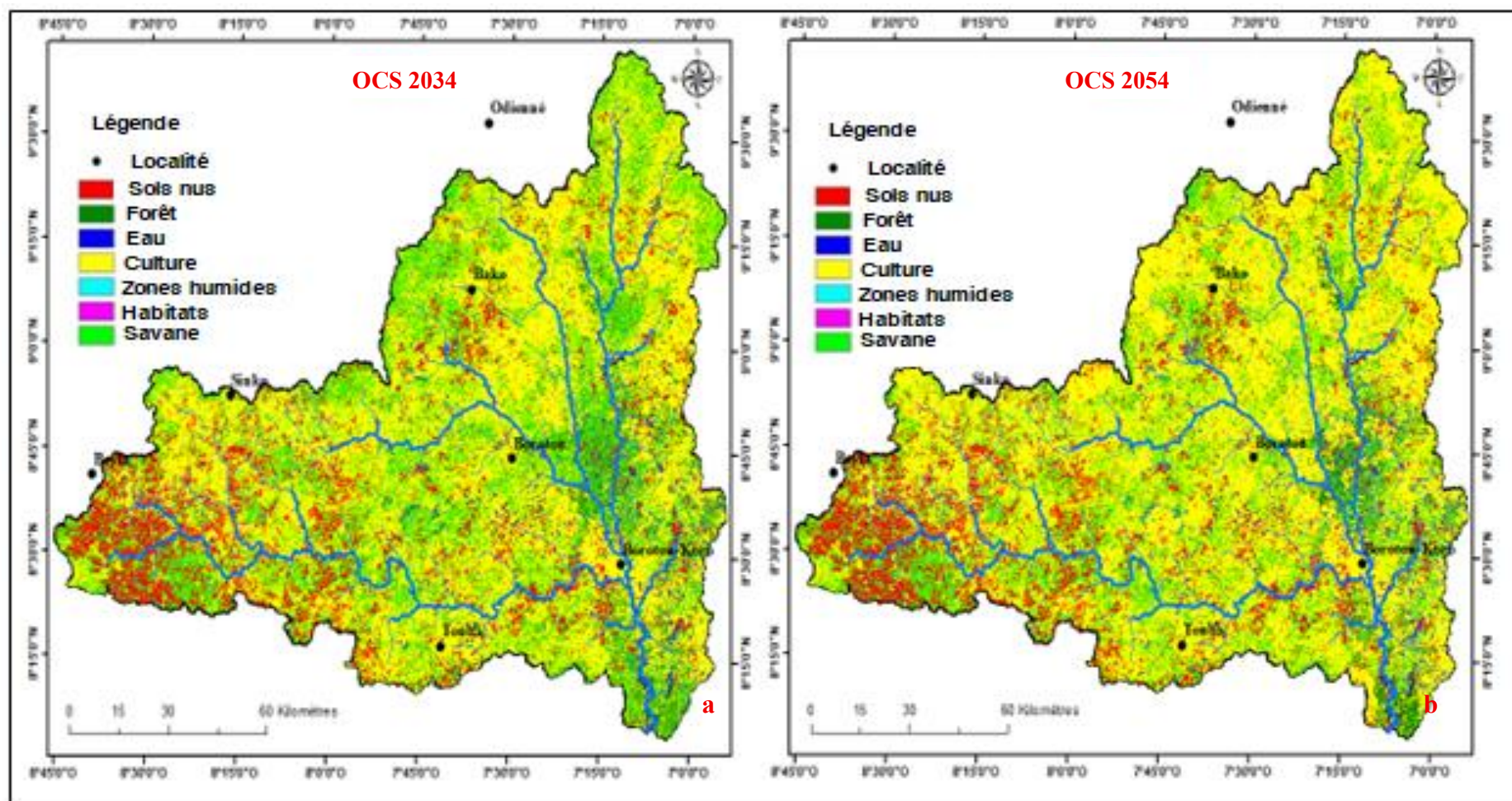


Figure 81: Cartes prédictives de l'occupation du sol du bassin versant de 2034 (a) et 2054 (b).

Les différentes tendances de changement sont illustrées statistiquement dans le tableau XL. On peut constater que, le recul de la forêt se fera au profit des cultures et des habitats principalement. Les zones de forêts dégradées sont fortement converties en cultures. Le taux d'évolution entre 2020 et les cartes simulées en 2034 et 2054 montre que les mosaïques de cultures, resteront la catégorie d'occupation la plus importante (857 848,9 ha en 2034 et 872 900,0 ha en 2054). Ainsi, les classes sols nus, cultures et habitats connaîtront les taux d'évolution les plus importants. Cependant, les classes forêt et savane connaissent un taux de régression considérable dans le temps. Ces taux passent de 3,0 % en 2020 à 2,3 % en 2034 et 1,7 % en 2054 pour la forêt. Quant à la savane, les taux sont de 35,4 % en 2020 à 35% en 2034 et 31,0% en 2054. Globalement les formations naturelles régressent au profit des formations anthropiques.

Tableau XL : Statistiques des superficies des classe d'occupation du sol (OCS) projetées en 2034 et 2054

| Classe d'occupation du sol | OCS 2020 | | OCS 2034 | | OCS 2054 | |
|----------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|
| | Superficie (ha) | Taux d'occupation (%) | Superficie (ha) | Taux d'occupation (%) | Superficie (ha) | Taux d'occupation (%) |
| Sols nus | 209629,2 | 11,3 | 214925,3 | 11,6 | 210179,1 | 11,3 |
| Forêt | 54872,1 | 3,0 | 42655,8 | 2,3 | 30679,8 | 1,7 |
| Eau | 60185,5 | 3,2 | 56185,5 | 3,0 | 60185,5 | 3,2 |
| Cultures | 845780,3 | 45,5 | 857848,9 | 46,2 | 872900,0 | 47,0 |
| Zones humides | 11744,2 | 0,6 | 11140,7 | 0,6 | 10620,4 | 0,6 |
| Habitats | 17713,7 | 1,0 | 24992,8 | 1,3 | 98220,4 | 5,3 |
| Savane | 658254,3 | 35,4 | 650430,3 | 35,0 | 575394,2 | 31,0 |

OCS : Occupation du sol

7.5. Application du modèle hydrologique CEQUEAU au bassin versant du fleuve

Sassandra à Sorotona

Les résultats liés à l'application du modèle hydrologique CEQUEAU au bassin versant du Sassandra à Sorotona sont présentés. Ces résultats concernent les simulations sur la période historique (1970-2020) avec les cartes d'occupation du sol de 1986, 2003 et 2020 d'une part, et d'autre part, sur les horizons futurs à l'aide des cartes d'occupation du sol futures de 2034 et 2054.

7.5.1. Données préparées

7.5.1.1. Carreaux entiers et carreaux partiels

La figure 82 présente les résultats de la discrétisation du bassin versant en carreaux entiers et en carreaux partiels. La discrétisation spatiale du bassin versant a été faite avec des mailles de

20 km de côté. Ainsi, 68 carreaux entiers ont été obtenus. La subdivision des carreaux entiers en carreaux partiels a donné 117 carreaux partiels.

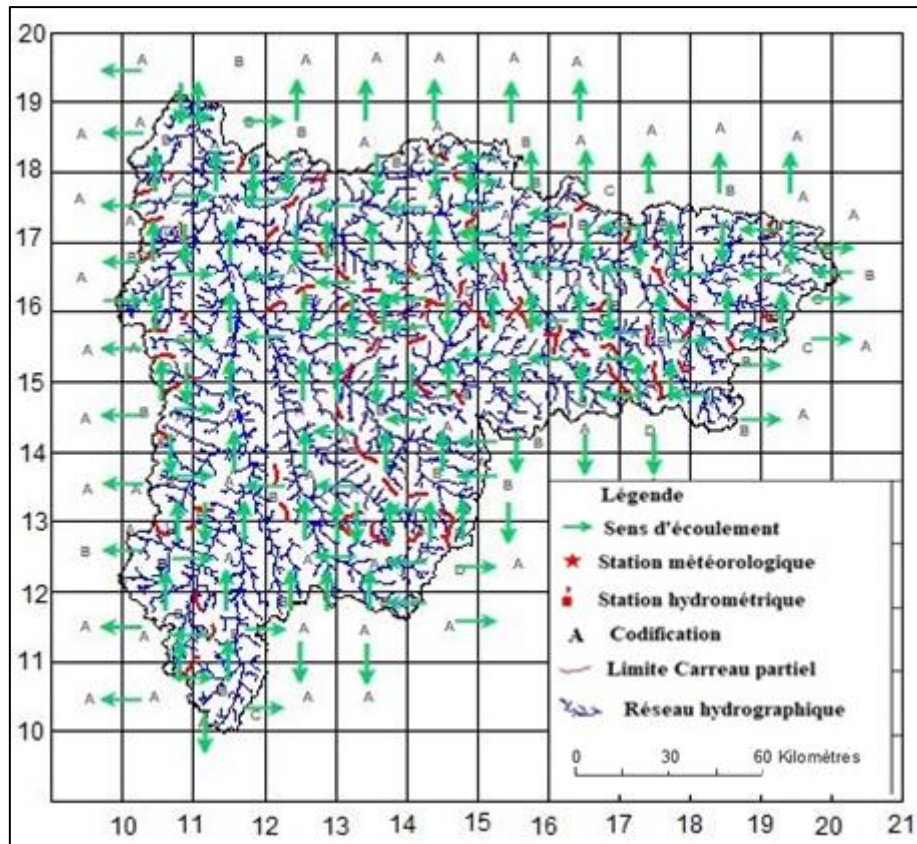


Figure 82 : Discretisation du bassin versant en carreaux entiers et partiels

7.5.1.2. Données du bassin versant

Le tableau XLI présente les numéros des stations pluviométriques et hydrométriques utilisées pour la modélisation hydrologique avec le modèle CEQUEAU ainsi que les coordonnées relatives aux carreaux et leurs altitudes respectives.

Tableau XLI : Caractéristiques des stations hydrométéorologiques

| Nom station | Numéro de la station | Coordonnées (I ; J) | Code carreau | Altitude (m) |
|-------------------------------|----------------------|---------------------|--------------|--------------|
| Station météorologique | | | | |
| Borotou Koro | 005000 | 12-17 | A | 316 |
| Odienné | 016000 | 14-11 | A | 400 |
| Touba | 020500 | 15-18 | B | 490 |
| Beyla | 187000 | 20-16 | A | 690 |
| Station hydrométrique | | | | |
| Sorotona | 00112 | 12-20 | A | - |

7.5.1.3. Précisions des surfaces

Les erreurs relatives aux surfaces obtenues après la préparation des données physiographiques dans le bassin versant sont présentées dans le tableau XXXIII. Ces erreurs ne dépassent pas 5% comme le stipule les règles de modélisation avec le modèle CEQUEAU.

Cette précision montre que les données physiographiques sont bien préparées et le maillage est bien réparti sur l'ensemble du bassin versant.

Tableau XLII : Précisions des surfaces du bassin versant après préparation des données de carreaux

| Numéro station hydrométrique | Abscisse (I) | Ordonnée (J) | Code carreau partiel | Numéro réel | Bassin versant calculé (km ²) | Bassin versant réel (km ²) | Erreur (%) |
|------------------------------|--------------|--------------|----------------------|-------------|---|--|------------|
| 00112 | 12 | 20 | B | 1 | 18 576 | 18 581 | -0,03 |

7.5.1.4. Données physiographiques

La superposition des données physiographiques et des cartes d'occupation du sol du bassin versant est présentée à la figure 83. La figure montre la forme sous laquelle le modèle intègre l'ensemble des données physiographiques. Selon les différents scénarios, les changements de carte d'occupation du sol sont effectués.

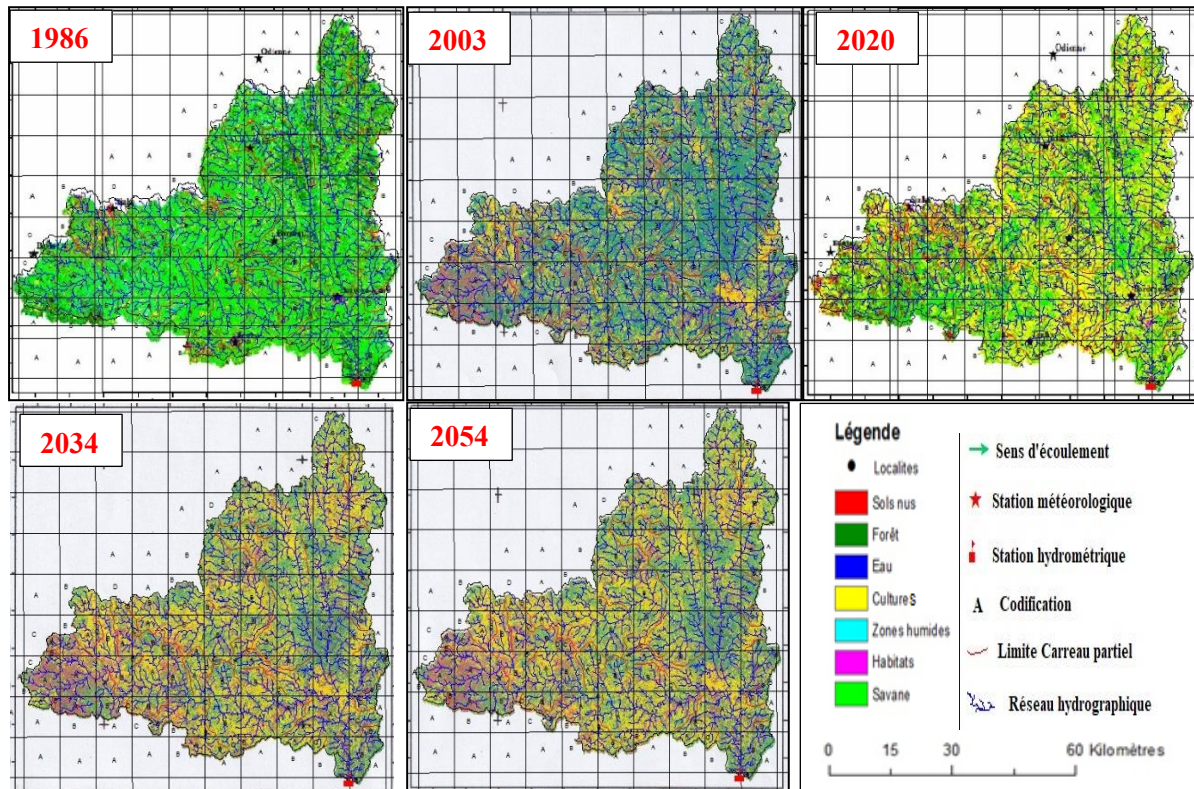


Figure 83 : Superposition de la grille de discrétisation aux cartes d'occupation du sol du bassin versant

7.5.1.5. Paramètres optimaux de simulation dans le bassin versant avec le modèle CEQUEAU

Les paramètres d'optimisation de la simulation sont illustrés par le tableau XLIII. Les paramètres optimaux de simulation ont été obtenus après plusieurs ajustements du modèle. Ces paramètres concourent à placer le bassin versant dans une situation semblable à la réalité. L'ensemble des simulations par le modèle aura ces paramètres comme base physique.

Tableau XLIII : Valeurs optimales des paramètres de simulation du modèle CEQUEAU

| Paramètres | Valeurs optimales | Paramètres | Valeurs optimales |
|------------|-------------------|------------|---------------------|
| JOEVA | 80,000 | HRIMP | 0 |
| CVMAR | 0,1000 | COEP | 2,9 |
| CVNB | 0,015 | EVNAP | 0,0224 |
| CIN | 0,5 | TRI | 0 |
| CVNH | 0 | XAA | 1,3959 |
| CVSB | 0,0048 | XIT | 17,3196 |
| CVSI | 0,045 | XLA | 88 |
| XINFMA | 0,61 | COET | -0,001 |
| HINF | 57,038 mm | HSINI | 10 mm |
| HINT | 47,875 mm | HNINI | 0 mm |
| HMAR | 0,0823 mm | HMINI | 0 mm |
| HNAP | 71,3 mm | Qo | 0 m ³ /s |
| HPOT | 181,0 mm | EXXKT | 0,095 |
| HSOL | 358,0 mm | ZN | 0,03 j |

7.5.2. Critères de calage et de validation du modèle dans le bassin versant

7.5.2.1. Critères numériques

Les résultats du calage et de la validation du modèle CEQUEAU sont résumés dans le tableau XLIV. Le choix de la période de calage et des périodes de validation s'est fait en tenant compte de l'occupation du sol. Ainsi, le calage a été effectué sur une période prenant en compte l'occupation de 1986, comme support physiographique. Pour la première et la deuxième validation, des périodes couvrant les cartes d'occupation du sol de 2003 et 2020, ont respectivement été utilisées. Au calage, le coefficient de Nash obtenu après plusieurs ajustements est de 0,81. Ce résultat est satisfaisant car il est supérieur à 50% et tend vers 1 (valeur optimale). Le débit moyen observé est 142,09 m³/s et le débit moyen calculé est 142,2 m³/s. Les valeurs journalières interannuelles de la lame d'eau observée et calculée sont respectivement 482,4 mm et 525,3 mm. Au niveau de la validation, sur la première période (2001-2005), le coefficient de Nash obtenu est de 0,65 avec un débit observé de 132,1 m³/s et un débit calculé de 113,5 m³/s. Les valeurs journalières interannuelles de la lame d'eau observée et calculée sont respectivement 1122,7 mm et 1064,2 mm.

Sur la deuxième période de validation (2017-2020), le coefficient de Nash est de 0,68. Le débit observé à cette période est de 153,8 m³/s et le débit calculé est de 119,1 m³/s. Les valeurs journalières interannuelles de la lame d'eau observée et calculée sont respectivement de 1045,7 mm et 968,9 mm.

Tableau XLIV : Synthèse des critères numériques de calage et de validation

| Période | Débit annuel moyen (m ³ /s) | | Lame d'eau interannuelle moyenne (mm) | | Critère de Nash |
|-------------------|--|---------|---------------------------------------|----------|-----------------|
| | Observé | Calculé | Observée | Calculée | |
| Calage | | | | | |
| 1984-1986 | 142,9 | 142,2 | 482,4 | 525,3 | 0,81 |
| Validation | | | | | |
| 2001-2005 | 132,1 | 113,54 | 1122,7 | 1064,2 | 0,65 |
| 2017-2020 | 153,8 | 119,1 | 1045,7 | 968,9 | 0,68 |

Le tableau XLV présente les lames d'eau mensuelles observées et calculées pendant la période de calage et leurs écarts relatifs. Les valeurs positives et négatives traduisent respectivement une surestimation et une sous-estimation des lames d'eau simulées (calculées). Ainsi, on peut constater une surestimation des lames d'eau calculées du mois d'avril au mois d'août et des sous-estimations de janvier à mars et de septembre à décembre.

Tableau XLV: Lame d'eau mensuelle observées et calculées de 1984 à 1986 (Calage)

| Mois | Lame d'eau mensuelle interannuelle (mm) | | Différences (%) | Bilan |
|-----------|---|----------|-----------------|-----------------|
| | Observée | Calculée | | |
| Janvier | 33,1 | 11,8 | -21,3 | Sous-estimation |
| Février | 16,0 | 6,2 | -9,8 | |
| Mars | 11,9 | 9,9 | -2,1 | |
| Avril | 20,3 | 32,4 | 12,2 | Surestimation |
| Mai | 31,6 | 102,9 | 71,3 | |
| Juin | 53,2 | 148,4 | 95,2 | |
| Juillet | 135,7 | 241,3 | 105,6 | |
| Août | 375,9 | 497,8 | 121,9 | Sous-estimation |
| Septembre | 443,8 | 383,2 | -60,6 | |
| Octobre | 274,9 | 172,6 | -102,3 | |
| Novembre | 137,0 | 65,8 | -71,2 | |
| Décembre | 50,6 | 25,3 | -25,3 | |

7.5.2.2. Critères graphiques

Les critères graphiques présentés par les figures 84 et 85 sont les illustrations les plus utilisées pour l'analyse des résultats de simulation hydrologique car ils permettent de faciliter les ajustements des paramètres lors du calage du modèle.

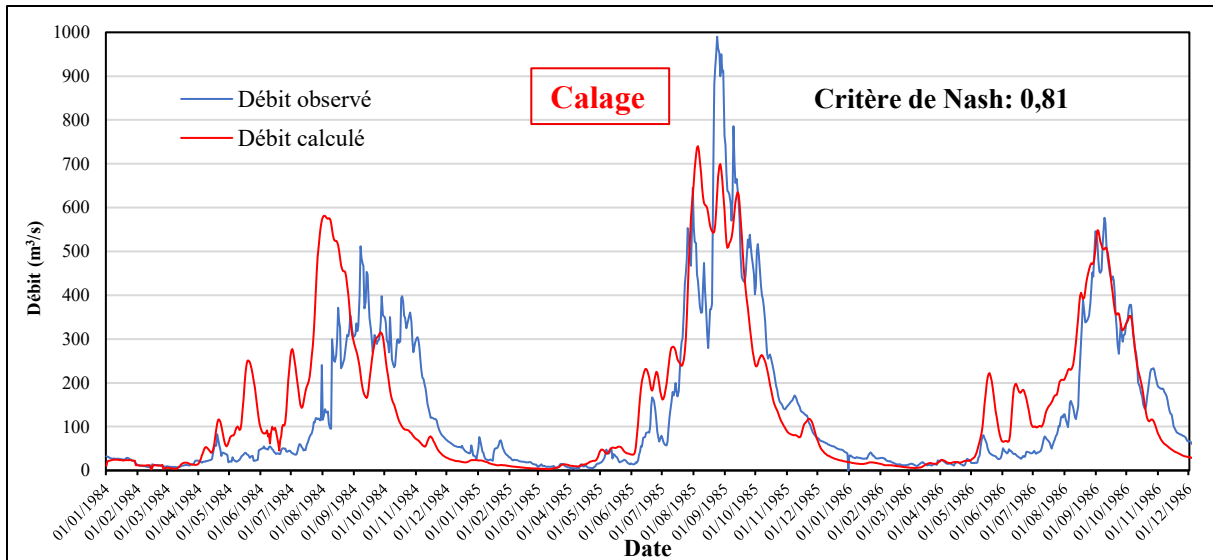


Figure 84: Hydrogrammes journaliers interannuels pour la période de calage (1984-1986)

Sur la figure 80, les débits calculés sont surestimés dans un premier temps du mois de janvier au mois de mars et ensuite que du mois de septembre au mois de décembre. Aussi, le modèle sous-estime les débits calculés du mois d'avril au mois d'août. La courbe des débits cumulés présentée à la figure 81 montre une bonne similitude entre les débits observés et les débits calculés avec un critère de Nash de 97 %.

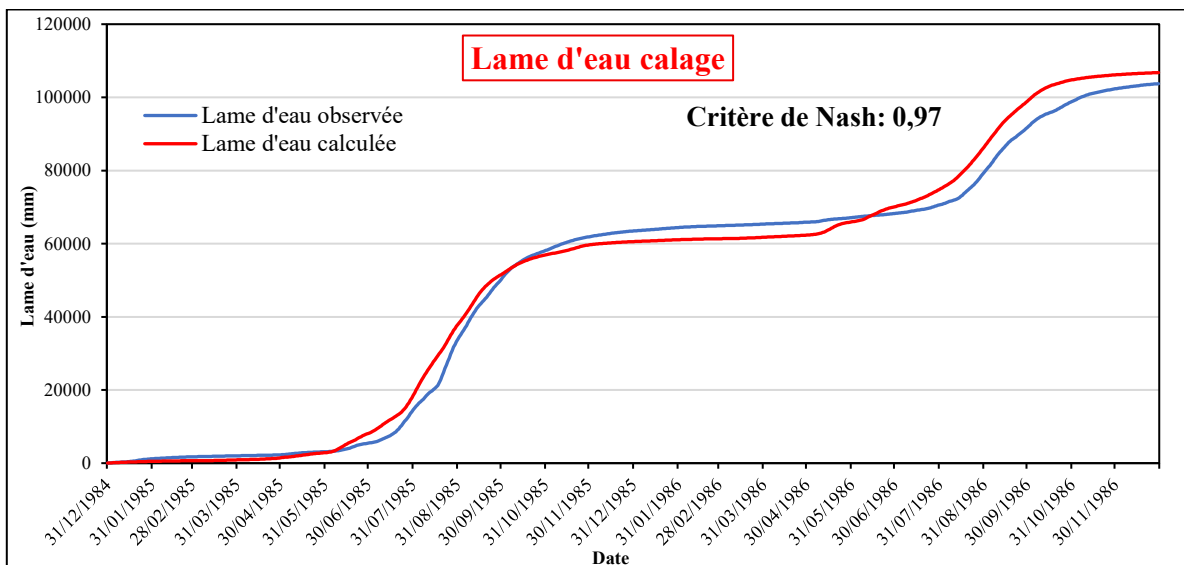


Figure 85 : Évolution des débits journaliers cumulés sur la période de calage (1984-1986)

Quant aux résultats graphiques de la validation, ils sont présentés aux figures 86 et 87. Sur la figure 82, les débits calculés sont surestimés du mois de mai au mois de septembre et sous-estimés les périodes de janvier à avril et d'octobre à décembre. La figure 83 qui présente la deuxième période de validation, montre que les périodes de surestimation et de sous-estimation sont les mêmes que celles de la première validation.

Il ressort de l'analyse des résultats de calibration et de validation que le modèle CEQUEAU surestime les écoulements en période d'étiage et les sous-estime en période de crue.

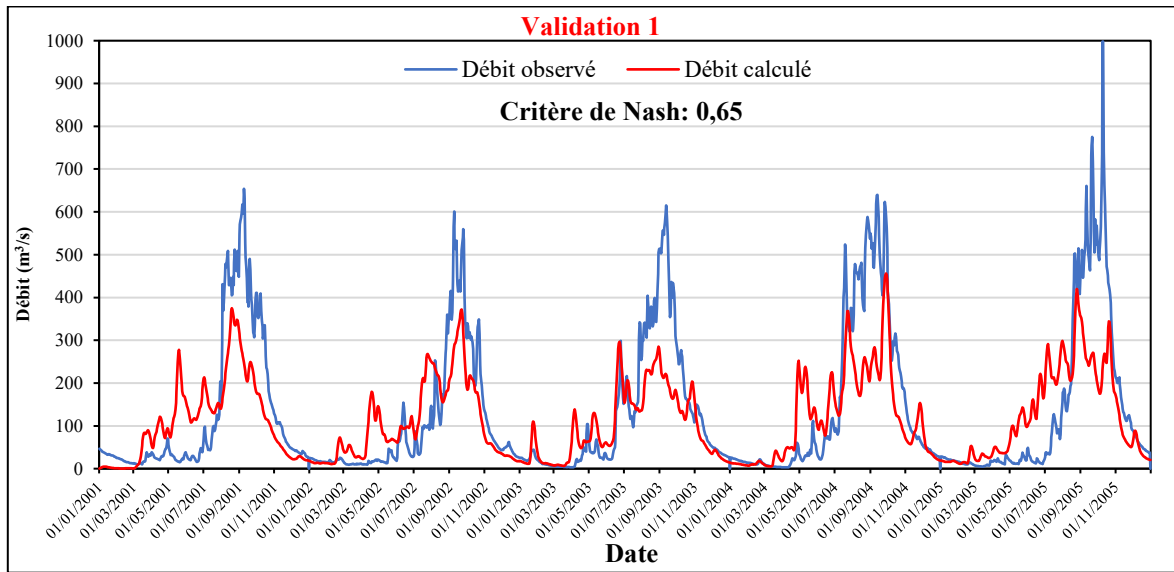


Figure 86 : Hydrogrammes journaliers interannuels à la validation 1 (2001-2005)

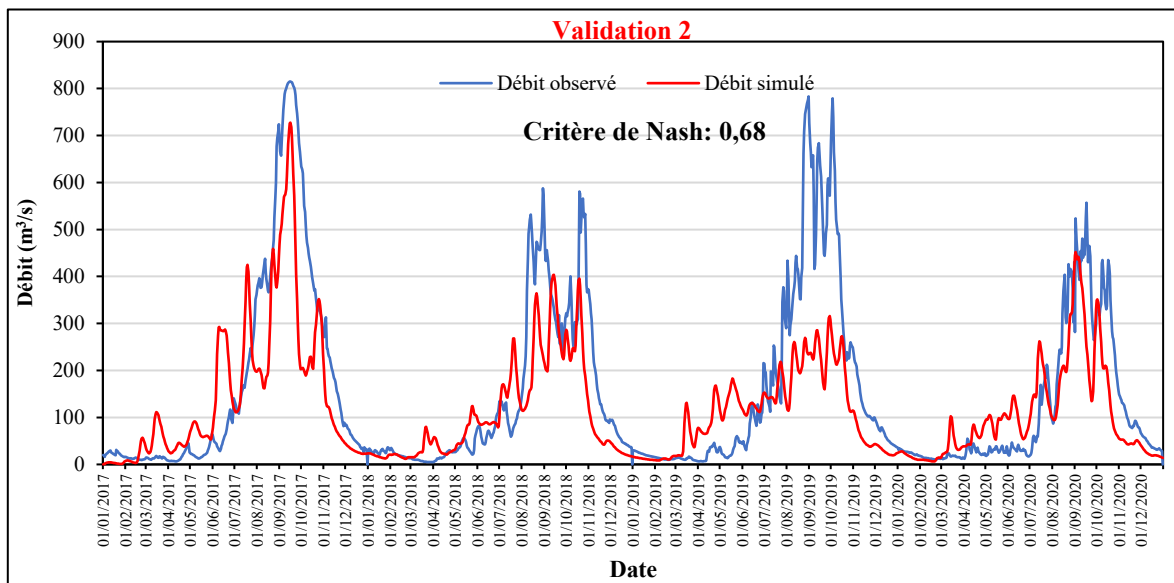


Figure 87 : Hydrogrammes journaliers interannuels à la validation 2 (2017-2020)

7.5.3. Analyse des résultats de la validation à l'échelle mensuelle

La présentation interannuelle des débits moyens mensuels sur les périodes 2001-2005 (Figure 88a) et 2017-2020 (Figure 88b) montre l'ampleur de la surestimation ou de la sous-estimation des lames d'eau simulées et observées à l'exutoire du bassin versant. La tendance à la surestimation des lames d'eau simulées concerne cinq mois dans l'année. Il s'agit des mois de mars à juillet. Les mois d'août à décembre connaissent une sous-estimation. Seul le mois de février ne connaît ni de surestimation et de sous-estimation. Avec ces graphiques, il est possible

de passer facilement d'un pas de temps à un autre pour voir la précision de la variation. Ces résultats sont valables sur les périodes de calage que sur les périodes de validation.

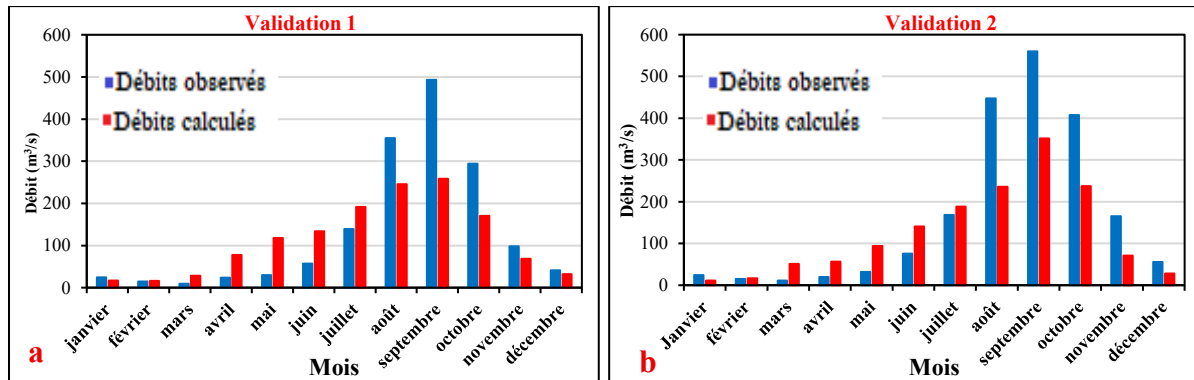


Figure 88 : Histogramme interannuelle des débits moyens mensuels calculés et observés sur la période 2001-2005 (a) et 2017–2020 (b).

7.6. Suivi des écoulements dans le bassin versant face au changement d’occupation du sol et au changement climatique

7.6.1. Évaluation des écoulements dans le bassin versant avec la dynamique de l’occupation du sol

7.6.1.1. Évolution des écoulements avec l’occupation du sol passée dans le bassin versant

La figure 89 présente les écoulements simulés avec la carte d’occupation de 1986 prise comme référence pour le suivi des autres simulations. Sur le graphe, on constate que la moyenne des débits sur la période 1980-1990 est de 144 m³/s, avec des débits de pointe très importants allant de 400 m³/s à environ 1200 m³/s.

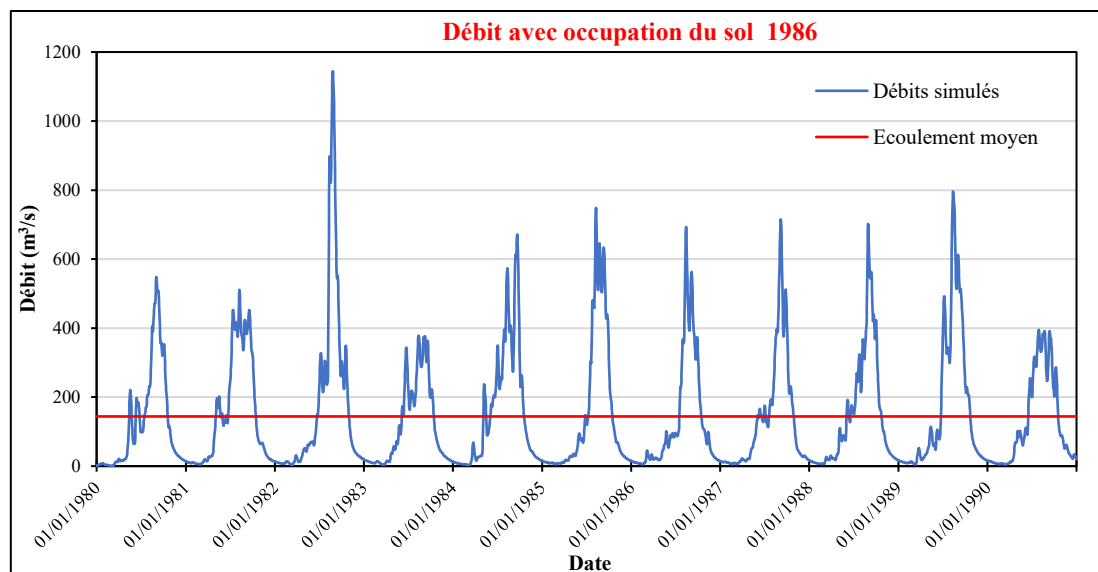


Figure 89 : Hydrogramme des débits moyens journaliers observés avec l’occupation du sol de 1986

Il ressort de l'analyse de la figure 90 que les lames d'eau obtenues de la simulation de l'occupation du sol de 2003, donnent des pics d'écoulement assez importants que celles obtenues par la simulation de l'occupation du sol de 1986, du fait de la mise à nu des terres. Le débit moyen obtenu ($161 \text{ m}^3/\text{s}$) dans les mêmes conditions indique que les écoulements liés à la simulation de l'occupation du sol de 2003 sont supérieurs à ceux issus de l'occupation du sol de 1986. La hausse des écoulements se situe dans l'ordre de 10 à 11%.

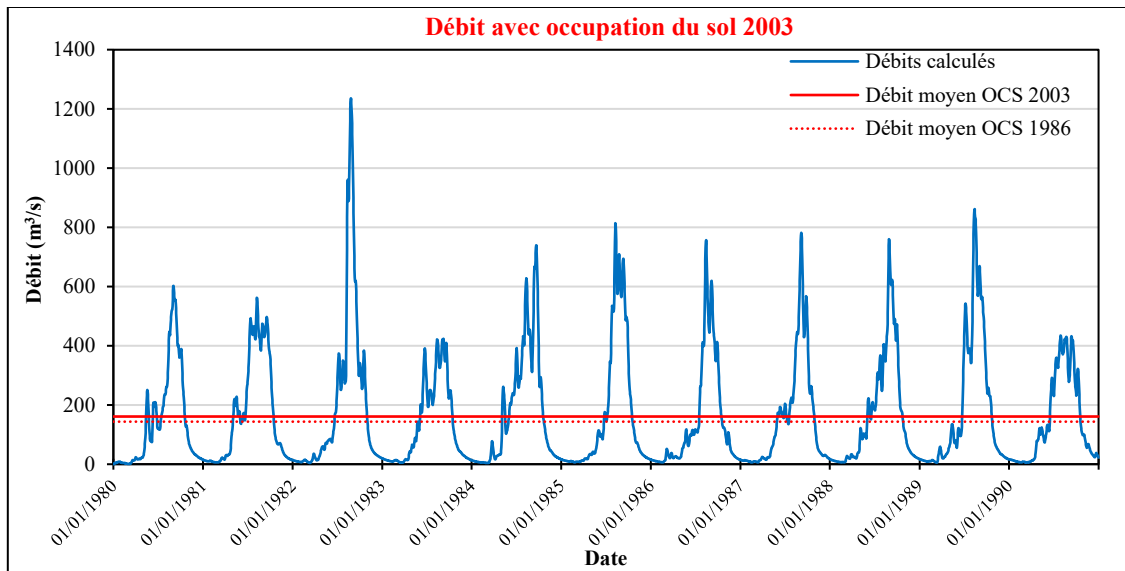


Figure 90 : Hydrogramme des débits moyens journaliers observés avec l'occupation du sol de 2003

La simulation des écoulements à partir de la carte d'occupation du sol de 2020 (Figure 91), produit pratiquement les mêmes écoulements que celle de l'occupation de sol de 1986. En effet, l'intensification de la culture d'anacarde favorise une révégétalisation du paysage contribuant ainsi à la réduction des crues d'écoulement. Le débit moyen enregistré au cours de cette simulation est de $141 \text{ m}^3/\text{s}$ avec des pics qui restent très importants (supérieurs à $1000 \text{ m}^3/\text{s}$) sur la période considérée.

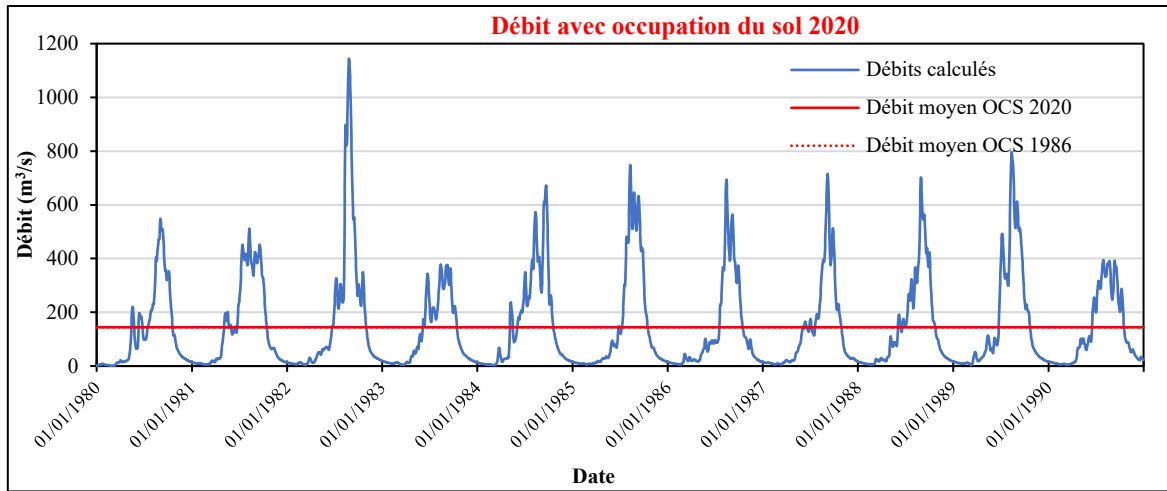


Figure 91 : Hydrogrammes des débits moyens journaliers observés avec l'OCS de 2020

7.6.1.2. Évolution des écoulements avec l'occupations du sol futur dans le bassin versant

La simulation des écoulements avec les cartes d'occupations du sol futures met en évidence l'importance des pics de crues au fur à mesure que la couverture forestière se réduit dans le bassin versant. Cette augmentation des volumes d'eau se fait dans l'ordre décroissant de la présence de la couverture végétale dans le bassin versant comme illustré à la figure 92a pour l'année 2034 et la figure 92b pour l'année 2054. En effet, plus la surface du bassin est mise à nu, plus les débits de pointe sont marqués. Le passage d'un type d'occupation du sol à l'autre augmente les débits journaliers de 18% pour l'OCS de 2034 et de 21% pour l'OCS de 2054 par rapport à l'OCS de 1986. A travers ces observations, la couverture végétale joue le double rôle de modérateur des écoulements et de réducteur des pointes de crue.

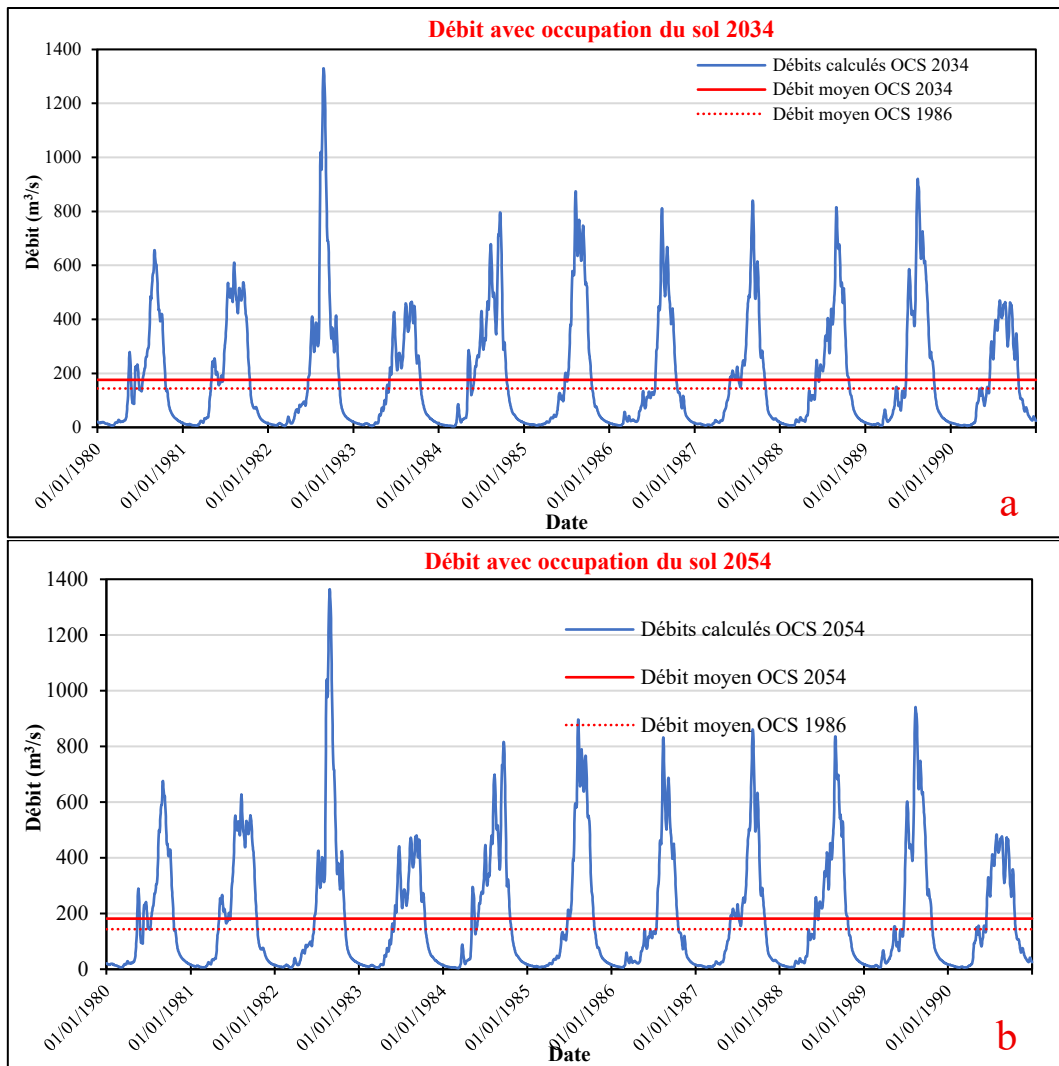


Figure 92: Hydrogrammes des débits moyens journaliers observés avec l'occupation du sol de 2034 (a) et 2054 (b)

7.6.1.3. Évolution mensuelle des écoulements dans le bassin versant avec les changements d'occupation du sol

La figure 93 montre l'évolution mensuelle des écoulements dans le bassin versant avec les changements d'occupation du sol. Les graphes de la figure montrent que les lames écoulées dans le bassin versant suivent la même allure que le régime pluviométrique. La comparaison des lames d'eau écoulées pour l'occupation de sol de référence (1986) à celles écoulées pour les autres OCS révèle que, plus le bassin versant se dégrade, plus les lames d'eau écoulées sont importantes. Ainsi, les lames d'eau obtenues pour l'OCS de 2054 qui est plus dégradé sont plus importantes que celles obtenues pour l'OCS de 2034 qui est moins dégradée. Les lames d'eau écoulées pour l'OCS de 2003, tributaires des grands défrichements pour l'agrandissement des vergers ont occasionné les augmentations d'écoulements comparativement à l'OCS de 2020 avec une recolonisation du paysage par les cultures de rente. Cette mutation dans l'occupation

des terres a entraîné une recrudescence des débits par rapport à la référence (OCS 1986). Aussi, avec l'OCS de 2020, on assiste à une diminution des écoulements par rapport à la référence.

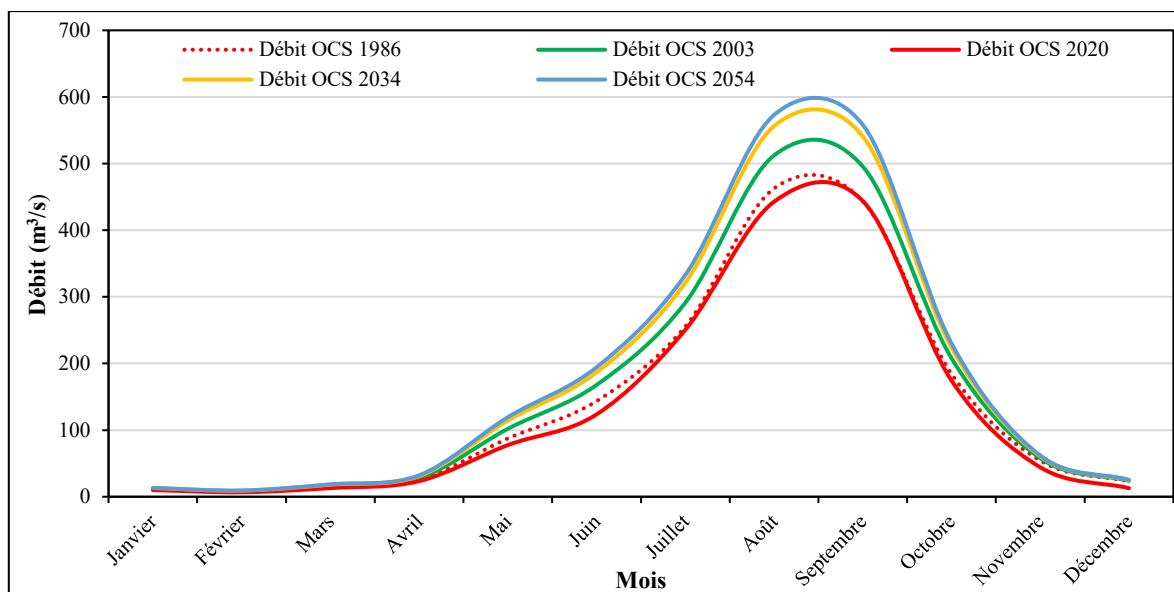


Figure 93 : Hydrogrammes des débits moyens mensuels des OCS en 1986, 2003, 2020, 2034 et 2054

7.6.2. Évaluation des écoulements dans le bassin versant face au changement climatique

La figure 94 montre l'évolution des écoulements futurs dans le bassin versant selon les scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5 sur les périodes 2021-2040 et 2041-2060 par rapport à la période de référence 1980-1990. Cette simulation ne prend en compte que les effets du changement climatique par utilisation des données climatiques futures (pluies et températures) de 2021 à 2060 avec la carte d'occupation du sol de l'année 2020 maintenue constante. Les résultats montrent une bonne correspondance entre les régimes hydrologiques simulés sur les horizons 2040 et 2060 et ceux de la période de référence (1980-1990). En effet, quelle que soit la période considérée, les mois d'août et de septembre demeurent les mois où se produisent les pics de crues aux horizons 2040 et 2060. En termes de dynamique, il n'y a pas de modification du régime hydrologique. Les périodes de basses eaux et de hautes eaux restent identiques à celles observées sur la période de référence 1980-1990. Toutefois, les modifications portent essentiellement sur les volumes d'eau écoulés. Tous les modèles climatiques (RCA4, RACMO22T et REMO2009) et leurs scénarios (RCP4.5 et RCP8.5) ne sont pas unanimes sur une baisse ou une hausse des apports mensuels à l'exutoire du bassin versant. Ainsi, selon le modèle RACMO22T, une baisse des apports de 32% est prévue à l'horizon 2040 selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. A l'horizon 2060, cette baisse des apports d'eau pourrait se

poursuivre et sera de l'ordre de 31% selon le scénario le plus optimiste RCP4.5 et de 32% selon le scénario pessimiste RCP 8.5. En dépit de la baisse d'écoulement constatée, le modèle RACMO22T prévoit selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 une surestimation des débits de janvier à mai et de novembre à décembre et une sous-estimation de mai à novembre aux horizons 2040 et 2060. Les pics d'écoulement mensuels selon ce modèle sont de 300 m³/s sous les deux scénarios aux horizons 2040 et 2060.

Les projections du modèle RCA4 prévoient une baisse des débits mensuels de l'ordre de 5,6% selon le scénario RCP4.5 et de 13,1% pour le scénario RCP8.5 à l'horizon 2040. À l'horizon 2060, on observe un maintien de la baisse des écoulements dans le bassin versant. A cet effet, l'horizon 2060 sera marqué par une baisse des apports d'eau de l'ordre de 3,1 % selon le scénario RCP4.5 et de 10% selon le scénario RCP8.5. A l'horizon 2040, les surestimations de débits seront observées de janvier à août pour le scénario RCP4.5 et de janvier à juillet et de novembre à décembre pour le scénario RCP8.5, quant aux sous-estimations elles seront observées d'août à décembre pour le scénario RCP4.5 et de juillet à novembre pour le scénario RCP8.5. Les pics d'écoulement sont estimés à 500 m³/s pour le scénario RCP4.5 et à 400 m³/s pour le scénario RCP8.5. A l'horizon 2060, sous le scénario RCP4.5, les surestimations sont observées du mois de mars au mois de mai et du mois de juin au mois d'août et la sous-estimation survient du mois d'août au mois de décembre. Les pics d'écoulement sont de 500 m³/s. Par contre, sous le scénario RCP8.5, les surestimations sont bien marquées du mois de janvier au mois d'août et en décembre et la sous-estimation apparaît du mois d'août au mois de novembre avec des pics d'écoulement d'environ 350 m³/s.

Quant au modèle REMO2009, il prévoit une augmentation considérable des apports d'eau dans le bassin quel que soit le scénario climatique (RCP4.5 et RCP8.5). Une augmentation de 138,2% et de 102,8 % des débits à l'horizon 2040 respectivement selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Cette augmentation à l'horizon 2040 pourrait se poursuivre à l'horizon 2060, mais à des proportions inférieures à celle de 2040. Ainsi, à l'horizon 2060, une hausse de 119,7% est observée selon le scénario RCP4.5 et 117,8% selon le scénario RCP8.5. Pour les deux scénarios aux horizons 2040 et 2060 aucune sous-estimation des débits n'est constaté et les surestimations ont tous lieu du mois d'avril au mois de novembre. Les pics de débits sont de 900 m³/s et 1100 m³/s respectivement pour le scénario RCP4.5 et RCP8.5 à l'horizon 2040. A l'horizon 2060, les pics d'écoulement sont de 1000 m³/s pour le scénario RCP4.5 et 1052 m³/s pour le scénario RCP8.5.

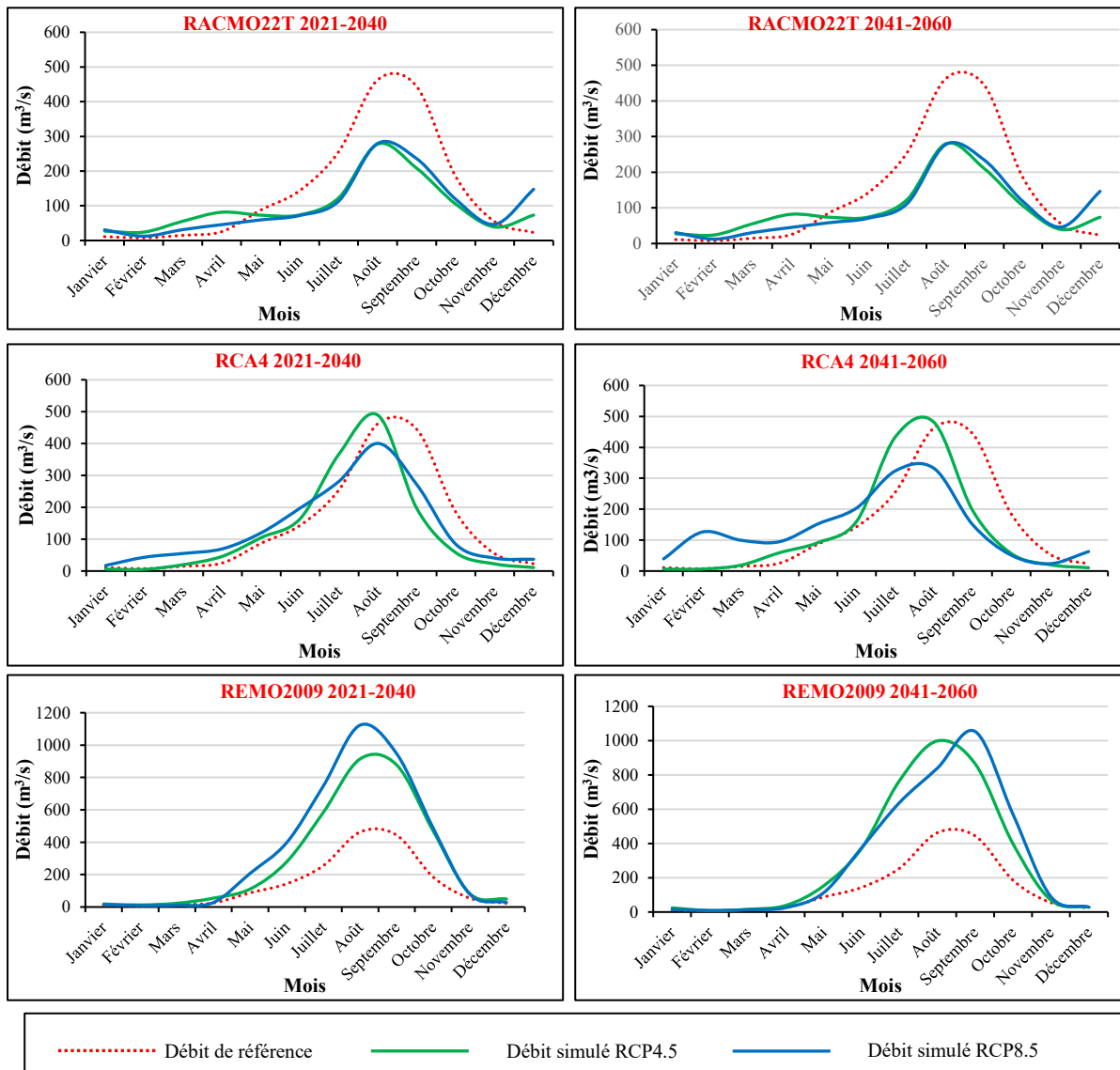


Figure 94 : Evolution des écoulements mensuels aux horizons 2030 et 2050 selon les modèles climatiques RACMO22T, RCA4 et REMO2009

7.6.3. Effet combiné du changement climatique et des changements d’occupation du sol sur les écoulements dans le bassin versant

7.6.3.1. Effet combiné de l’occupation du sol 2034 au changement climatique

La figure 95 illustre les écoulements mensuels futurs dans le bassin versant sous le scénario de la combinaison de l’OCS de 2034 et des données climatiques futures. On constate que dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona, l’effet combiné de l’occupation du sol de 2034 et les paramètres climatiques du modèle RACMO22T pourrait entraîner une baisse annuelle des écoulements de l’ordre de 12,7% et 32,3% à l’horizon 2040 respectivement selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. A l’horizon 2060, la baisse constatée à l’horizon 2040 pourrait se poursuivre et atteindre 30,9% selon les scénarios RCP8.5. Par contre, le scénario RCP4.5

prévoit une hausse de 4,1% par rapport à la période de référence 1986-2005. A l'horizon 2040, selon le scénario RCP4.5 du modèle RACMO22T, les débits sont surestimés du mois de janvier au mois de mai et du mois de novembre au mois de septembre. Ils sont sous-estimés entre les mois de mai et de novembre. Les pics de débits selon le scénario RCP4.5 atteignent 280 m³/s. Pour le scénario RCP8.5, les débits sont surestimés entre les mois de janvier et fin mai et au mois de décembre. Les sous-estimations surviennent de la fin mai au mois de novembre avec des pics d'écoulement de plus de 400 m³/s. A l'horizon 2060, selon le modèle RACMO22T sous le scénario RCP4.5 les écoulements sont surestimés du mois de janvier au mois de mai et de la mi-novembre au mois de décembre alors que les sous-estimations s'observent du mois de mai à la fin du mois de novembre. Pour ce scénario, les pics d'écoulement sont d'environ 300 m³/s. Par contre, le scénario RCP8.5, surestime les débits du mois de janvier au mois de juin et de la mi-novembre au mois de décembre. Les débits sous-estimés sont enregistrés du mois de juin à la mi-novembre avec les pics d'écoulement d'environ 450 m³/s.

Le modèle RCA4 projette également une baisse des apports dans le même ordre d'évolution que le modèle RACMO22T. Les écoulements baisseront dans l'ordre de 1,3% et 8,4% à l'horizon 2040 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Cependant, à l'horizon 2060, la baisse des écoulements survenue sera observée pour le scénario RCP8.5 avec une proportion de 5,1% alors que le scénario RCP4.5 indique une hausse des écoulements de l'ordre de 1,3%. À l'horizon 2040 du modèle RCA4 selon le scénario RCP4.5, les débits sont surestimés durant la période allant du mois de mars au mois d'août, tandis qu'ils sont sous-estimés entre du mois d'août au mois de décembre. Les pics de débits dépassent les 500 m³/s. En revanche, pour le scénario RCP8.5, une surestimation des débits est observée entre le mois de janvier et le mois d'août ainsi que de fin novembre au mois de décembre, alors que des sous-estimations apparaissent du mois d'août jusqu'à la fin novembre, avec des pics d'écoulement dépassant 400 m³/s. À l'horizon 2060, selon le scénario RCP4.5, les écoulements sont surestimés du mois de mars à la fin du mois d'août, tandis que des sous-estimations se manifestent de la fin du mois d'août au mois de décembre, les pics d'écoulement atteignent alors environ 510 m³/s. Par ailleurs, pour le scénario RCP8.5, les débits sont surestimés du mois de janvier au mois d'août et de fin novembre à décembre, tandis que les sous-estimations concernent la période allant du mois d'août à la mi-novembre, avec des pics d'écoulement avoisinant 350 m³/s.

Le modèle régional REMO2009, quant à lui, prévoit sur les différents horizons une hausse des écoulements dans le bassin versant. Selon le scénario RCP4.5 et RCP8.5, les apports seront à la hausse respectivement de 147,5% et 109,1% à l'horizon 2040 par rapport à la période de référence 1986-2005. A l'horizon 2060, la hausse annuelle des écoulements observés à

l'horizon 2040 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 sera maintenue à la baisse (128,8%) pour le scénario RCP4.5, mais pourrait atteindre 126,3% selon le scénario RCP8.5. La prédiction des apports d'eau dans le bassin versant montre que le scénario combiné des changements climatiques et de l'occupation du sol de 2034 entraîne à la fois une hausse et une baisse des écoulements. À l'horizon 2040, conformément au scénario RCP4.5, les débits sont surestimés du mois d'avril au mois de décembre, tandis que du mois de janvier au mois de mars, on constate que les débits ne sont ni surestimés, ni sous-estimés. Les pics de débits pour le scénario RCP4.5 atteignent alors presque 1000 m³/s. Concernant le scénario RCP8.5, la surestimation des débits est observée de la mi-avril au mois de décembre. La période de janvier à avril, affiche une tendance de ni surestimation, ni sous-estimations, avec des écoulements de pointe qui atteignent 1200 m³/s. À l'horizon 2060, les écoulements sont surestimés de la mi-avril au mois de décembre, alors qu'à la période de janvier à la mi-avril les débits ne sont ni sous-estimations, ni surestimés et ceux pour les deux scénarios. Les pics d'écoulement sont plus de 1000 m³/s pour les scénarios.

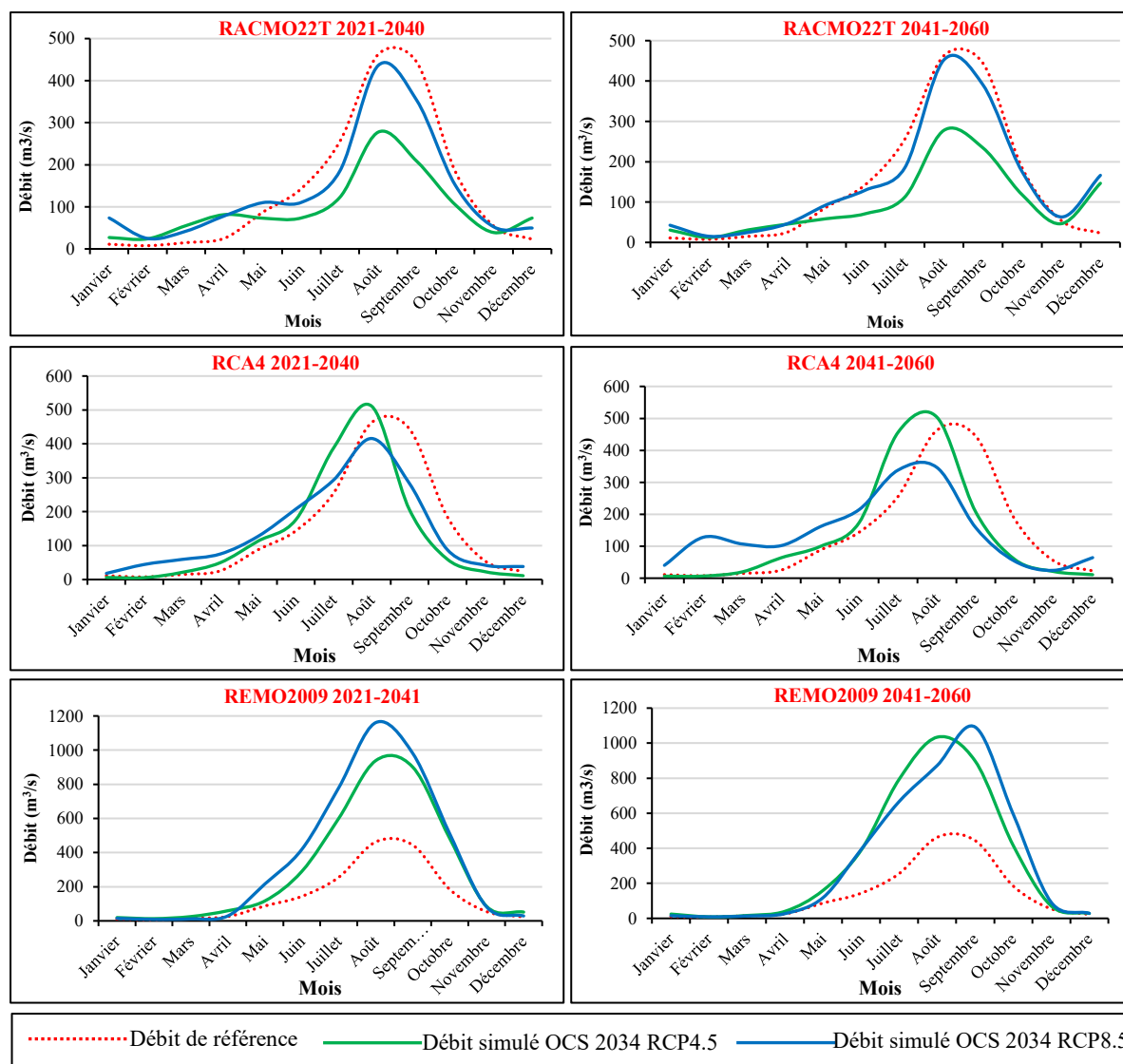


Figure 95: Hydrogrammes des écoulements mensuels futurs avec la combinaison du changement climatique et de l'OCS 2034 selon les modèles climatiques RACMO22T ; RCA4 et REMO2009

7.6.3.2. Effet combiné de l'occupation du sol de 2054 au changement climatique

La figure 96 illustre les écoulements mensuels futurs dans le bassin versant sous le scénario de la combinaison de l'OCS de 2054 et des données climatiques futures. Le scénario de l'effet combiné de l'occupation du sol de 2054 et du changement climatique, produit des écoulements qui évoluent dans le même ordre que ceux produits avec la carte d'occupation du sol de 2034. Ainsi, le modèle RACMO22T pourrait entraîner une baisse annuelle des écoulements dans le bassin versant de l'ordre de 32,3% à l'horizon 2040 et 30,9% à l'horizon 2060 sous le scénario RCP 8.5. Par contre, le scénario RCP4.5 prévoit de légère hausse d'écoulement de l'ordre de 0,9 % et 7,6% respectivement aux horizons 2040 et 2060. À l'horizon 2040, conformément au scénario RCP4.5, les débits sont surestimés du mois de janvier au mois de mai ainsi qu'en décembre, tandis qu'ils sont sous-estimés entre le mois de mai et le mois de novembre. Les pics

de débits atteignent environ 300 m³/s. Pour le scénario RCP8.5, les débits sont surestimés entre les mois de janvier et de juin ainsi qu'en décembre, alors que des sous-estimations sont observées du mois de juin au mois de novembre, avec des pics d'écoulement d'environ 450 m³/s. À l'horizon 2060, selon le scénario RCP4.5, les écoulements sont surestimés du mois de janvier au mois d'avril ainsi que de la mi-novembre à décembre, tandis que des sous-estimations apparaissent du mois de mai au mois d'octobre. Les pics d'écoulement pour ce scénario s'élèvent à environ 450 m³/s. Par contraste, le scénario RCP8.5 surestime les débits de janvier à juin et de la mi-novembre à décembre. En revanche, les débits sont sous-estimés entre juin et la mi-novembre, avec des pics d'écoulement approchant 480 m³/s. À l'horizon 2040, selon le scénario RCP4.5, les débits sont surestimés durant la période allant du mois de mars au mois d'août ainsi qu'en décembre. Tandis qu'ils sont sous-estimés entre le mois de septembre au mois de novembre. Les maximas des débits atteignent approximativement 500 m³/s. En ce qui concerne le scénario RCP8.5, une surestimation des débits est observée entre le mois de janvier et mois d'août, alors que des sous-estimations se manifestent du mois de septembre au mois de décembre, avec des pics d'écoulement s'élevant à 400 m³/s. À l'horizon 2060, selon le scénario RCP4.5, les écoulements sont surestimés du mois de mars à la mi-avril, tandis que des sous-estimations apparaissent entre les mois de septembre au mois de décembre. Les pics d'écoulement dans ce cadre atteignent près de 450 m³/s. Par contre, le scénario RCP8.5 indique une surestimation des débits du mois de janvier au mois de juillet et au mois de décembre. En revanche, ceux-ci sont sous-estimés entre les mois d'août au mois de novembre, avec des valeurs maximales avoisinant 350 m³/s.

Comme le modèle RACMO22T, le modèle RCA4 projette également une baisse des écoulements de 5,1% et 1,8% aux horizons 2040 et 2060 selon le scénario RCP8.5. Cependant, à l'horizon 2040 et 2060, le scénario RCP4.5 prévoit une hausse des écoulements respectivement de 2,0% et 4,6% par rapport à la période de référence. À l'horizon 2040, selon le scénario RCP4.5, les débits sont surestimés durant la période allant du mois de mars au mois d'août ainsi qu'en décembre. Tandis qu'ils sont sous-estimés entre le mois de septembre au mois de novembre. Les maximas des débits atteignent approximativement 500 m³/s. En ce qui concerne le scénario RCP8.5, une surestimation des débits est observée entre le mois de janvier et mois d'août, alors que des sous-estimations se manifestent du mois de septembre au mois de décembre, avec des pics d'écoulement s'élevant à 400 m³/s. À l'horizon 2060, selon le scénario RCP4.5, les écoulements sont surestimés du mois de mars à la mi-avril, tandis que des sous-estimations apparaissent entre les mois de septembre au mois de décembre. Les pics d'écoulement dans ce cadre atteignent près de 450 m³/s. Par contre, le scénario RCP8.5 indique

une surestimation des débits du mois de janvier au mois de juillet et au mois de décembre. En revanche, ceux-ci sont sous-estimés entre les mois d'août au mois de novembre, avec des valeurs maximales avoisinant 350 m³/s.

Enfin, le modèle REMO2009 prévoit sur les différents horizons et scénarios, une hausse des écoulements d'eau. Selon le scénario RCP4.5 et RCP8.5, les apports seront à la hausse respectivement de 154,9% et 126,9 % à l'horizon 2040 par rapport à la période de référence (1986-2005). La hausse annuelle des écoulements observés à l'horizon 2040 sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 va se poursuivre à l'horizon 2060 et pourrait atteindre 144,3 % et 135,9 % selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Les apports prédits par la combinaison du changement climatique et de l'occupation du sol de 2054 montrent que les activités anthropiques impactent fortement les écoulements dans le bassin versant du Sassandra à Sorotona. À l'horizon 2040, le scénario RCP4.5 et RCP8.5 surestiment des débits durant la période s'étendant d'avril à décembre. Cependant, les mois de janvier à mars ne présentent ni de sous-estimation ou de surestimation. Les débits maximaux atteignent approximativement 1100 m³/s et 1200 m³/s respectivement pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. À l'horizon 2060, les surestimations sont observées du mois de mai au mois de décembre pour les deux scénarios, avec des pics d'écoulement avoisinant 1200 m³/s.

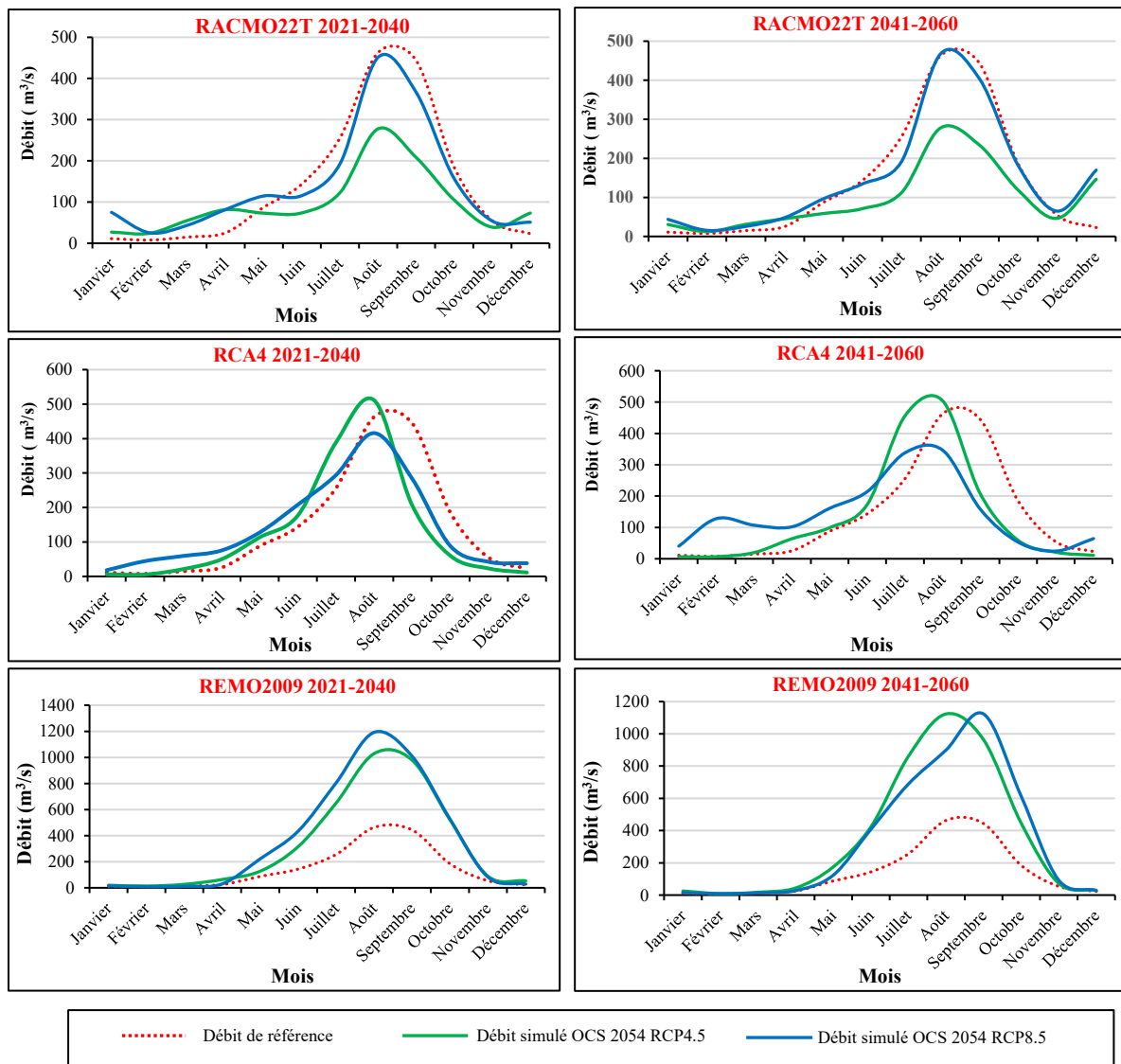


Figure 96 : Hydrogrammes des écoulements mensuels futurs avec la combinaison du changement climatique et de l’OCS 2054 selon les modèles climatiques RACMO22T, RCA4 et REMO2009

7.7. Caractérisation de la sécheresse hydrologique future dans le bassin versant

7.7.1. Indice de sécheresse hydrologique (SDI) des écoulements futurs

Les résultats de l’analyse de la sécheresse hydrologique future avec la carte l’occupation du sol de 2034 sont présentées à la figure 97. Les analyses montrent une alternance de périodes sèches et humides sur la période 2021-2060 pour tous les modèles et les scénarios climatiques. Ainsi, selon le scénario RCP4.5 du modèle RACMO22T, la plus longue période sèche de la chronique durera 60 mois (août 2024 à juillet 2029). Cette longue période sera suivie d’une deuxième qui débutera en avril 2045 pour prendre fin en juillet 2049 (52 mois) avec des amplitudes maximales de -1,9 et -1,6. Selon ce scénario, la sécheresse sera extrême avec une amplitude de -2. Le scénario RCP8.5 prévoit aussi une première longue période sèche d’août 2024 à juillet

2029 soit 60 mois avec une amplitude maximale de -2,2. La deuxième période de ce scénario ira du mois d'octobre 2024, au mois de juin 2049 (82 mois) avec une amplitude de -2,3. Le modèle climatique RCA4, sous le scénario RCP4.5 prévoit une alternance de courte période sèche dont la plus longue part de septembre 2033 à février 2039 (60 mois) avec une intrusion de 8 mois humides. L'amplitude maximale de cette période sèche est de -2. Sous le scénario RCP8.5, deux longues périodes sèches se feront remarquées. La première partira de novembre 2032 à mai 2039 et la seconde d'avril 2043 à juin 2049 avec une intrusion de 6 mois humides. Les amplitudes des périodes sèches pour le modèle climatique RCA4 sont de -1,6 et -2,6 respectivement pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Le modèle climatique REMO2009, quant à lui, prévoit des périodes sèches plus longues qui débiteront de juillet 2022 à avril 2027 et de septembre 2036 à juin 2042, sous le scénario RCP4.5. Les amplitudes maximales de ces sécheresses seront de -1,6 à -1. Selon le scénario RCP8.5, les périodes sèches se démarqueront bien des périodes humides avec des périodes qui partiront d'août 2051 à mars 2059 incluant une courte interruption de 9 mois humides.

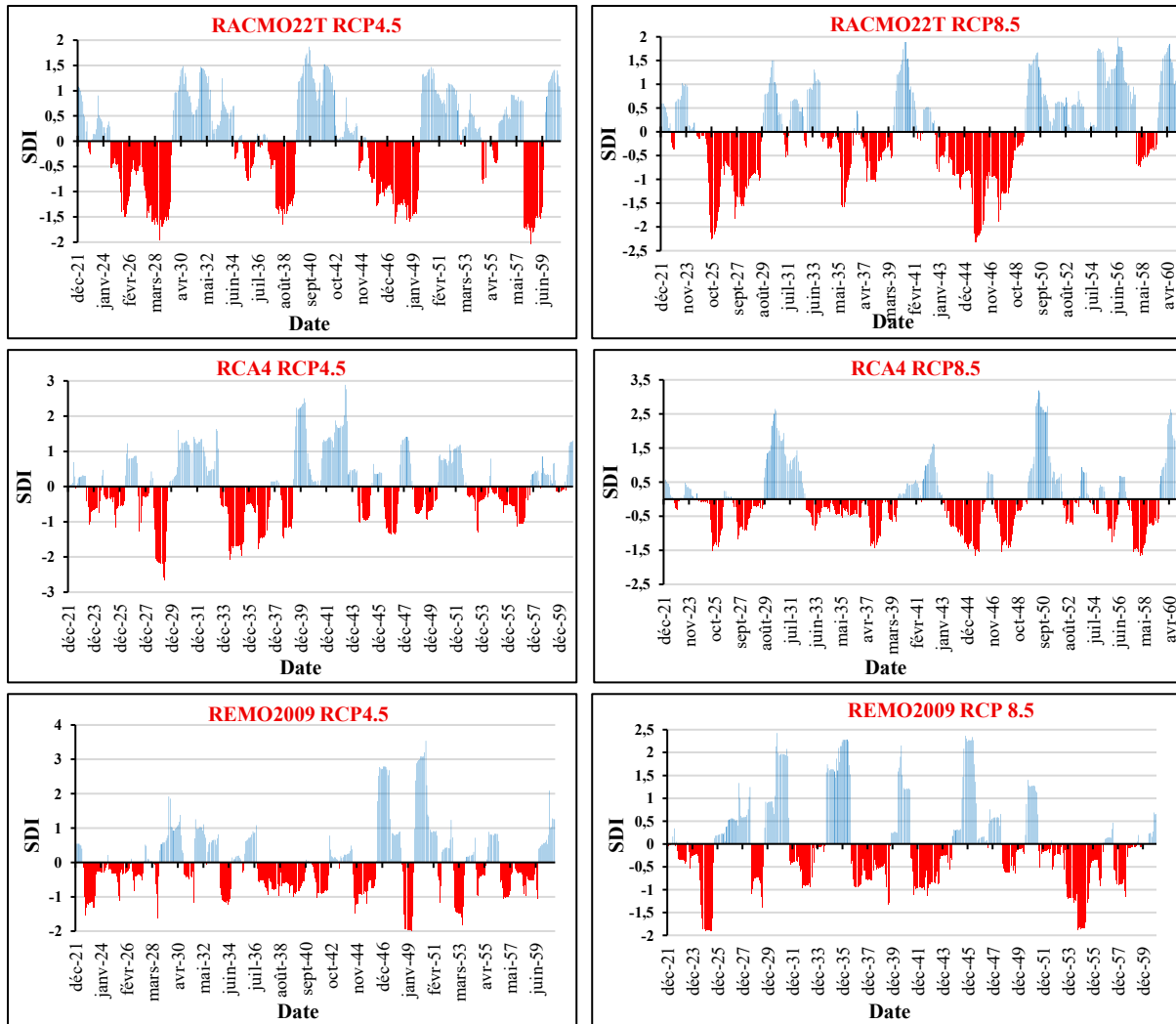


Figure 97 : Evolution de la sécheresse hydrologique de 2021 à 2060

7.7.2. Intensité et durée des séquences de sécheresse hydrologique futures

Les résultats de l'estimation de l'intensité de la sécheresse hydrologique au cours de la période 2021-2060 sont consignés dans le tableau XLVI. L'analyse de ce tableau montre que le bassin versant connaîtra une sécheresse importante. Selon le scénario RCP4.5, les épisodes d'octobre 2045 (RACMO22T), mai 2029 (RCA4) et juin 2025 (REMO2009) seront caractérisés respectivement par une sécheresse extrême et sévère avec des intensités respectives de -2,3 ; -1,6 et -1,9. Quant au scénario RCP8.5, les indices montrent que les épisodes de juillet 2058 du modèle RACMO22T, de mai 2029 du modèle RCA4 et d'avril 2049 du modèle REMO2009 indiqueront tous des sécheresses extrêmes dans le bassin versant avec des indices allant de -2,6 à -2. L'analyse de la durée des épisodes de sécheresse montre qu'elles varieront d'une station à l'autre avec une moyenne de 70 mois.

Tableau XLVI : Intensité des séquences de sécheresse hydrologique futures (2021 à 2060)

| Paramètres | Modèles climatiques | | | | | |
|----------------------|-----------------------------|------------------------|----------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| | RACMO22T (RCP4.5) | RCA4 (RCP4.5) | REMO2009 (RCP4.5) | RACMO22T (RCP8.5) | RCA4 (RCP8.5) | REMO2009 (RCP8.5) |
| Intensité | -2,3 | -1,6 | -1,9 | -2,0 | -2,6 | -2,0 |
| Date d'occurrence | octobre 2045 | mai 2029 | juin 2025 | juillet 2058 | mai 2029 | avril 2049 |
| Durée (Mois) | 82 | 68 | 71 | 60 | 68 | 71 |
| Période d'occurrence | octobre 2042 - juillet 2049 | sept 2033 - avril 2039 | déc 2051 - mars 2060 | août 2044 - juillet 2059 | sept 2033 - avril 2039 | sept 2036 - juillet 2042 |
| Type de sécheresse | Extrême | Sévère | Sévère | Extrême | Extrême | Extrême |

7.7.3. Fréquence des séquences de sécheresse hydrologique future

La figure 98 présente les fréquences des séquences hydrologiques futures dans le bassin versant. L'analyse de la fréquence des séquences de sécheresse hydrologique future montre que les périodes sèches selon le scénario RCP4.5, seront comprises entre 21,1 % et 42,9 % pour le type atténué et entre 9,2 et 13,9% pour le type modéré. Par contre, les types sévère et extrême sont compris respectivement entre 2,6 et 8,3% et entre 0,2 et 2 %.

Quant au scénario RCP8.5, il prévoit des fréquences entre 37,1 et 50,5% et entre 4,9 et 11,7% pour les sécheresses de type atténué et modéré. Pour les sécheresses de type sévère et extrême, il prévoit des fréquences comprises entre 2,1 et 4,3% et entre 0 et 3%. Ces fréquences selon les différents modèles climatiques traduisent la présence d'une sécheresse atténuée et modérée sur le bassin versant sur la période de 2021 à 2060 de façon générale.

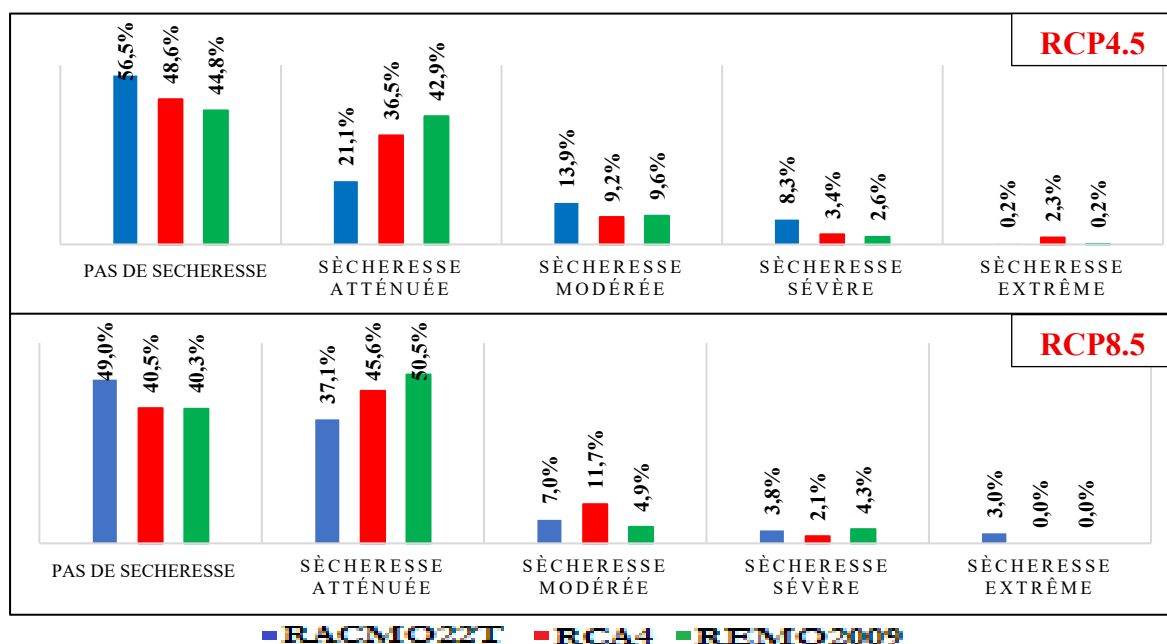


Figure 98 : Fréquence des classes d'intensité de sécheresse hydrologique future

7.7.4. Analyse des régimes hydrologiques dans le bassin versant

Les résultats des variations saisonnières des débits moyens mensuels au cours des périodes de hautes eaux et de basses eaux dans le bassin versant sur la période 2021 à 2060 sont consignés dans le tableau XLVII. Les débits moyens mensuels des trois modèles climatiques ont été considérés pour la détermination des deux périodes (basses eaux et hautes eaux) au cours de l'année hydrologique en se basant sur les valeurs du coefficient mensuel de débit (CMD). Partant de là, on observe la période des hautes eaux de juin à octobre. Cependant, les périodes de basses eaux sont observées de novembre à mai. Fort est de constater que l'ensemble des modèles climatique sont unanimes sur cette répartition aux horizons 2030 et 2060.

Tableau XLVII : Répartition des périodes de basses eaux (BE) et de hautes eaux (HE) sur la période 2021-2060

| Période | Scénario | Janv | Fév | Mar | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept | Oct | Nov | Déc |
|----------------------|----------|-------------|-----|-----|-----|-----|-------------|------|------|------|-----|-------------|-----|
| Court Terme | RCP4.5 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,7 | 1,0 | 2,1 | 3,3 | 2,2 | 1,0 | 0,3 | 0,3 |
| Court Terme | RCP8.5 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,7 | 1,1 | 1,8 | 3,2 | 2,6 | 1,2 | 0,3 | 0,2 |
| Long Terme | RCP 4.5 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 1,1 | 2,3 | 3,2 | 2,2 | 1,0 | 0,3 | 0,5 |
| Long Terme | RCP 8.5 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,7 | 1,2 | 1,8 | 2,8 | 2,5 | 1,2 | 0,3 | 0,5 |
| Période hydrologique | | Basses Eaux | | | | | Hautes eaux | | | | | Basses Eaux | |

Discussion

Les grands cours d'eau en Côte d'Ivoire ont subi une baisse de débits au début de la décennie 1970 comme constaté sur la majorité des cours d'eau en Afrique de l'Ouest et Centrale (Hubert *et al.*, 1989 ; Bricquet *et al.*, 1997 ; Ardoin-Bardin, 2004). Sur le fleuve Sassandra, cette diminution s'est traduite par une rupture de stationnarité en 1970 dans les séries chronologiques. Ainsi selon Koné (2019), la sécheresse s'est installée plus longuement dans l'évolution des modules annuels des cours d'eau à partir des décennies 1980 et 1990 comme pour la pluviométrie. Les modules annuels augmentent par exemple pendant la décennie 1990 et sur la période 2004-2009 dans le bassin versant. La baisse des précipitations et les déficits d'écoulement dans le bassin versant se sont donc amplifiés. Ces observations montrent l'interrelation des variations de la pluviométrie et des débits dans la zone. La présence d'interaction entre la pluie et les écoulements est étayée par les études de Yao *et al.* (2019) sur le Bandama blanc au Nord de la Côte d'Ivoire et de Koffi (2022) sur le bassin versant de la Lobo affluent du fleuve Sassandra dans le Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. Sur de nombreux cours d'eau en Côte d'Ivoire et comme dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona, la décennie 1990 voit aussi une amélioration des débits. C'est le cas de la rivière N'Zo à Kahin sur le bassin du Sassandra de 1994 à 2004 (Goula *et al.*, 2006).

Cela appuierait la présomption de fin de la sécheresse sahélienne durant les années 1990 évoquée par Ozer *et al.* (2003) en opposition avec le point de vue de L'Hôte *et al.* (2002). En effet, ces derniers pensaient qu'il est trop tôt pour l'affirmer. Cependant, le bassin versant du Sassandra à Sorotona se conforme à cette augmentation des débits depuis 2008. Cette variation dans les écoulements pourrait s'apparenter au paradoxe sahélien : augmentation des débits alors que les pluies baissent (Mahé & Paturel, 2009 ; Mahé *et al.*, 2010). Cela impliquerait qu'il ait une diminution de la couverture végétale naturelle, augmentation des zones cultivées et des sols nus sur ces bassins versants (Kouadio, 2011). Les variations saisonnières observées par périodes homogènes sont cependant identiques sur toute la période d'étude dans le bassin versant. Ainsi, en phase déficitaire de pluie, les écoulements baissent. La présence prolongée de la sécheresse hydrologique dans le bassin versant entraîne la baisse des écoulements jusqu'à l'atteinte des débits d'étiage. En effet, différents indices ont été définis pour caractériser l'étiage ainsi que les impacts que celui-ci peut avoir sur la ressource en eau. Ces indices d'étiage sont des statistiques dérivées des chroniques de débit. Smakhtin (2001) établit une liste exhaustive de ces indices et fait un état des lieux des différentes méthodes de caractérisation des étiages en contextes jaugés et non jaugés. Selon Lang Delus (2011), pour caractériser l'étiage annuel, on distingue les variables extraites à partir d'un critère temporel fixe (QMNA, VCN_d et QCN_d) de celles paramétrées par un débit fixe. On distingue par ailleurs, le débit d'étiage moyen mensuel (QMNA), qui est le plus bas de l'année tel que préconisé par la loi française sur l'eau de 1992. Les variables d'étiage utilisées varient selon les pays. Aux Etats-Unis et au Canada, la variable usuelle correspond au VCN7 (Pyrce, 2004 ; Hortness, 2006 ; Lang, 2011). Ces variables d'étiage sont en Autriche le Q95, en Suisse le Q97 (Garcia *et al.*, 2017). Selon plusieurs auteurs dont (Lang Delus, 2011) et Garcia *et al.* (2017), la variable usuellement employée par les gestionnaires pour caractériser les étiages d'un cours d'eau est le QMNA. L'étude de la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant a permis de ressortir que la classification liée au choix des classes d'occupation du sol a donné des valeurs assez élevées en termes de précision globale. Ces précisions sont estimées à 0,95 pour la carte d'occupation du sol de 1986, 0,74 pour celle de 2003 et de 0,75 pour la carte de 2020. Ces valeurs de Kappa sont particulièrement liées à la limitation des classes d'occupation du sol au nombre de 7. Ainsi, pour les mêmes nombres de classes d'occupation du sol, Kouadio (2011) a obtenu des valeurs assez élevées sur les bassins versants de l'Agnéby et du Boubo. La valeur de Kappa pourrait également être surestimée étant donné l'étendue de la zone et des points de référence utilisés pour la validation qui ne sont pas uniformément répartis. L'analyse des cartes d'occupation du sol du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona montre qu'il a été marqué par un

changement de son paysage. Les résultats statistiques des différentes classes d'occupation du sol en superficie indiquent une régression des classes forêt et savane. La superficie de la forêt qui était de 216 580 ha en 1986 est passée à 126 463 ha en 2003 puis à 39 244 ha en 2020. La superficie de savane est passée à son tour de 944 190 ha en 1986 à 888 946 ha en 2003 et enfin à 620 950 ha en 2020. Cette régression du couvert végétal naturel s'est réalisée au profit de l'augmentation des cultures, des habitats et des sols nus (apparition des affleurements rocheux due à la sécheresse). Ce constat est similaire aux conclusions des études de Kouamé (2017) et Konaté (2019) respectivement dans une étude de la dynamique de l'occupation du sol dans les bassins versants du Davo et de la Lobo dans le Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. En effet, les travaux de ces auteurs ont montré une dégradation du couvert végétal naturel. Cette dégradation est la résultante des activités anthropiques que sont les feux de brousse, l'exploitation abusive du bois, la création de nouvelles plantations et la croissance démographique que connaissent ces dernières années les pays d'Afrique subsaharienne. Ainsi, selon Traoré (2019), la politique nationale de développement basée sur l'agriculture a fortement influencé la dynamique du couvert végétal naturel en Côte d'Ivoire. En effet, de vastes superficies sont défrichées dans le bassin versant pour la création de plantation de canne à sucre, qu'elle soit industrielle ou villageoise. A cela s'ajoute, la valorisation du prix de la noix de cajou (anacarde) qui amplifie la mutation du paysage dans le bassin versant par la transformation de la végétation naturelle en culture. La prédiction de l'occupation du sol dans le bassin versant a été effectuée par le modèle Land Change Modeler (LCM). Aujourd'hui, un grand nombre de modèles d'occupation des sols ont été développés, ce qui permet de choisir un modèle en fonction des caractéristiques de la zone d'intérêt et des questions de recherche (Han *et al.*, 2015 ; Hasan *et al.*, 2020). Ainsi, le modèle a permis de prédire les changements d'occupation du sol pour les 14 et 28 prochaines années dans le bassin versant. Le principe de base utilisé dans le modèle LCM est d'analyser les changements d'occupation du sol entre les différentes classes sur la période 2003-2020, d'évaluer l'impact des variables explicatives et finalement prédire le modèle d'occupation du sol basé sur le choix des transitions potentielles. Le niveau d'association entre les variables explicatives et les différentes classes d'occupation du sol a été évalué en utilisant le coefficient V de Cramer qui calcule la corrélation entre des variables. Ce coefficient varie entre 0 et 1. Les variables explicatives utilisées ont des coefficients V de Cramer inférieurs à 0,15. Elles sont donc acceptables pour la modélisation. En effet, une forte corrélation ne tient pas compte de la complexité des relations entre les variables (Maestriperi & Paegelow, 2013 ; Kouamé, 2017). Ainsi, les potentiels de transition génèrent une forte conversion de la forêt et de la savane en cultures durant la période 2003-2020.

Cela peut s'expliquer sous diverses raisons qui sont les activités anthropiques. A cela, s'ajoute le phénomène de l'orpaillage illégal. Pour valider le modèle LCM, l'image simulée a été comparée à l'image réelle de l'occupation du sol de la même année 2020. Les résultats montrent une surestimation de certaines classes par le modèle LCM. Cette surestimation et sous-estimation de certaines classes lors des simulations pourrait être attribuable à la non prise en compte de certaines variables explicatives (Koffi, 2022). Il y a lieu de noter qu'à l'exception des variables calées aux modèles pour prédire l'occupation du sol future, d'autres variables s'ajoutent dont la spatialisation et la quantification sont pratiquement impossibles. Il s'agit des facteurs politiques et institutionnels (pauvreté, chômage, conflits, code forestier), des facteurs démographiques (migration, distribution de population) et des facteurs économiques (Boussougou, 2017). Ainsi, l'occupation du sol en 2034 et 2054 indique une tendance à l'augmentation des zones d'habitation, des cultures et une diminution des surfaces forestières et de savanes. Cette tendance pourrait s'expliquer par les pressions anthropiques et l'accroissement de la population dans le bassin versant. En effet, les projections faites selon INS (2021) prévoient un taux d'accroissement de la population de 2,6 % à l'horizon 2050 avec une population ivoirienne environnant les 57 119 185 habitants (Koffi, 2022). Ainsi, le cas particulier du bassin versant prévoit un taux au-delà du taux national à cause de la présence d'industries agro-alimentaires telles que Sucrivoire qui suscite une forte migration des populations autochtones nationales et étrangères. Dans le bassin versant, tout l'espace disponible sera converti à l'agriculture dans un futur proche. Cela pourrait occasionner un fort taux de déforestation dans ces régions. Les petites forêts seront certainement converties en terres agricoles. Les horizons 2030 à 2060 seront le prolongement des observations passées, c'est-à-dire une dégradation des surfaces forestières. Cette étude de la dynamique de l'occupation du sol et de la production de carte d'occupation du sol future a permis de support pour la quantification des écoulements dans le bassin versant. La quantification des ressources en eau pour la satisfaction des besoins hydriques pour la production sucrière dans l'exploitation agro-alimentaire dans cette étude, a été évaluée à l'aide du modèle hydrologique CEQUEAU. Le modèle a été calibré sur la période 1984-1986 et validé sur les périodes 2001-2005 et 2017-2020 avec la carte d'occupation du sol de l'année 1986 comme support. Trois modèles climatiques régionaux (RACMO22T, RCA4 et REMO2009) du projet Cordex-Africa pour les horizons 2040 et 2060 ont été utilisés, combinés aux cartes d'occupation du sol des années 2034 et 2054. Cette combinaison a permis au modèle CEQUEAU de quantifier les écoulements dans le bassin versant et de ressortir l'impact de la dynamique de l'occupation du sol sur ces écoulements. La préparation des données physiographiques a été vérifiée par la précision des

surfaces du bassin versant, avec un pourcentage d'erreur de -0,03%. Cette valeur étant inférieure à 5% indique que les données physiographiques ont bien été préparées et que la banque de drainage a été correctement formée. Ce taux d'erreur similairement satisfaisant a été obtenu par Kouadio (2011) et Kouamé (2017) respectivement sur l'Agnéby et le Boubo et sur le Davo. En effet, selon Morin & Paquet (2007), la différence de superficie entre les superficies reconstituées et les superficies réelles à chacune des stations hydrométriques ne doit pas dépasser 5%. Le modèle CEQUEAU a produit dans l'ensemble des résultats satisfaisants pendant la phase de calage et de validation. En effet, les critères de Nash obtenus au calage et à la validation sont respectivement de 0,81 et de 0,65 et 0,68. Ces résultats de la calibration et de la validation évoluent dans le même ordre que ceux obtenus par Brou (2005) sur le bassin versant de Sassandra à Soubré, par Kouadio (2011) sur les bassins versants d'Agneby et de Boubo, par Kouamé (2017) sur le bassin versant du Davo et par Koffi (2022) sur le bassin versant de la Lobo. Ces auteurs ont appliqué le modèle CEQUEAU pour la quantification des écoulements sur les bassins versants respectifs. Une dégradation du critère de Nash en passant du calage à la validation est observée sur la zone d'étude. Cette dégradation du critère de Nash du calage à la validation a été mentionnée par plusieurs auteurs dont Ardoin-Bardin (2004), Kouadio (2011), Ibrahim (2012), Kouamé (2017), Bourgin (2019). Fort est de constater qu'il y a quelques incertitudes dans l'exercice de la calibration et de la validation du modèle CEQUEAU. En effet, la qualité des résultats dépend des données d'entrée, des paramètres et de la structure du modèle (Kouamé, 2017). Le modèle CEQUEAU prend en compte des données physiographiques et hydrométéorologiques (pluie, température et débit) pour son fonctionnement. Le processus de la mise en place de ces données est une tâche complexe et difficile. Parmi les données hydrométéorologiques pour le fonctionnement de CEQUEAU, les données de débits observés pourraient être à l'origine des écarts constatés sur les périodes de calibration et de validation. Ces mêmes constats ont été faits par Goula *et al.* (2009). En effet, leur mesure nécessite dans un premier temps que le cours d'eau soit jaugé par l'établissement de la courbe débits-hauteurs limnimétriques. Ensuite, à partir de cette courbe de tarage, les hauteurs limnimétriques journalières relevées sont ainsi traduites en données de débits (Kouadio, 2011). Concernant les autres données hydrométéorologiques à savoir les données météorologiques, la température reste précise, car elle varie très peu dans l'espace. Considérée comme l'entrée principale des modèles pluie-débit, la pluie doit sa qualité aux caractéristiques des dynamiques météorologiques dans le bassin versant, aux pas de temps d'observation et à la densité de la répartition du réseau pluviométrique. De fortes incertitudes demeurent ainsi dans le protocole de collecte de ces données en termes de qualité. Mais aussi en termes de quantité

c'est-à-dire dans l'estimation de la précision spatiale nécessaire à ces mesures pour avoir une estimation fiable des quantités moyennes précipités au sein du bassin versant. La difficulté pour représenter correctement la pluie vient essentiellement du fait que c'est un phénomène à la fois non continu dans le temps et variable dans l'espace. La variabilité spatiale de la pluie est une source majeure d'incertitude dans la modélisation hydrologique (Volpi *et al.*, 2012). En d'autres termes, les incertitudes dans les simulations hydrologiques dépendent des erreurs des données d'entrée (Crow & Van Loon, 2006 ; Götzinger & Bárdossy, 2008 ; Renard *et al.*, 2010). Ainsi, l'impact du changement climatique et de l'occupation de sol sur les débits varie en fonction de la variabilité des précipitations prévues par chaque modèle climatique. Tous les modèles climatiques ne sont pas unanimes sur une baisse ou une hausse constante des apports d'eau sur les horizons 2040 et 2060. Selon Op de Hipt (2018), cette divergence entre les modèles peut être attribuée à la disponibilité des données et à une connaissance limitée de la climatologie régionale. Cela a été étayé par la phase 5 du projet d'inter comparaison de modèles couplés (CMIP5) qui a montré différents changements de précipitations jusqu'en 2050. Cependant, la hausse constante de la température pourrait aussi avoir des impacts sur la situation des apports annuels du bassin versant. En effet, les variations des débits simulés suivent la dynamique des précipitations pour le futur. Ainsi, la hausse des températures et le déficit pluviométrique prévus par les modèles climatiques en fonction des différents scénarios climatiques traduisent une hausse et une baisse des écoulements sous chaque scénario de chaque modèle aux horizons 2040 et 2060. Lorsque les deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5) de changement climatique sont combinés au changement d'occupation du sol pour certains modèles climatiques, les résultats montrent que, malgré une baisse ou une hausse de la pluviométrie à l'horizon 2040 et 2060, on observe une hausse des apports d'eau dans le bassin versant. Ce même constat a été fait pour Koffi (2022) dans le bassin versant de la Lobo. Cette hausse des écoulements pourrait être liée à la pression démographique et à la forte diminution des zones forestières, remplacées par des cultures et des sols nus dont la capacité au ruissellement est élevée (Mahé *et al.*, 2005; Sanjay *et al.*, 2017 ; Stanzel *et al.*, 2018). Ainsi, la couverture forestière se comporterait comme une éponge retenant les précipitations qu'elle restituerait lentement, émoussant les crues et constituant un soutien véritable des étiages. Elle jouerait un rôle inhibiteur de l'écoulement avec un fort pouvoir évaporatoire et facilitant l'infiltration. Ainsi, les régressions des zones forestières conduisent à une accélération de l'écoulement, voire à des crues, et augmentent l'activité érosive dans le bassin (Joorabian Shooshtari *et al.*, 2017 ; Seydou *et al.*, 2018 ; Descroix, 2018 ; Farinosi *et al.*, 2019; Twisa *et al.*, 2020 ; Kiprotich *et al.*, 2021), ce qui traduit

des écoulements considérables dans le bassin versant à la suite des scénarios de combinaison pluie et température future et occupation du sol future.

Conclusion partielle

L'étude des écoulements met en évidence le comportement perméable du bassin versant qui se traduit par un faible coefficient de corrélation entre les pluies tombées et le ruissellement. Sur la période d'étude, les écoulements ont connu des tendances à la baisse dont la première est survenue en juillet 1970 et la seconde en décembre 1999. Les pics de débits journaliers dans le bassin versant atteignent 500 m³/s au mois de septembre et les plus faibles débits surviennent au mois de mars avec des écoulements n'excédant pas 10 m³/s. L'analyse des résultats de l'occupation du sol dans le bassin versant à partir de l'utilisation des images satellitaires Landsat a permis de suivre l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol. Les changements observés entre 1986 et 2003 puis entre 2003 et 2020 montrent que les mutations de l'occupation des sols dans le bassin versant sont importantes. Ces mutations montrent de façon générale l'expansion des surfaces de cultures, d'habitats et de sols nus au détriment des zones forestières et savaniques du bassin versant. La prédiction de l'occupation future du sol dans le bassin versant a été rendue possible grâce au modèle Land Change Model. Ainsi, une phase de calage du sous-modèle de transition a permis de valider la carte prédictive par rapport à la carte de référence de 2020. Les résultats obtenus des cartes simulées à l'horizon 2040 et 2060 montrent que les cultures, les zones d'habitats et les sols nus continueront d'accroître alors que le couvert végétal naturel (forêt et savane) diminuera. Les plans d'eau resteront relativement stables dans le bassin versant. Les écoulements dans le bassin versant à Sorotona ont été simulés par le modèle hydrologique CEQUEAU avec les données observées et les données futures. Le modèle a été calibré et validé avec les données observées dont les critères de Nash sont au-dessus de 50%. L'impact des changements climatiques sur les ressources en eau du bassin versant montre que quel que soit la période considérée, le mois de septembre demeure le mois où se produisent les pics de crues quel que soit la période (horizon 2040 ou 2060). Les modèles climatiques (RACMO22T, RCA4 et REMO2009) sont divergents sur une baisse ou une hausse des écoulements sous les scénarios (RCP4.5 et RCP8.5). La prise en compte de la dynamique de l'occupation du sol montre qu'une régression du couvert végétal naturel augmente les écoulements en période de crue, et affaiblit considérablement les débits d'étiage.

CHAPITRE 8 : RAPPORT ENTRE LA DEMANDE ET LA DISPONIBILITÉ EN EAU DANS L'EXPLOITATION AGRICOLE DE BOROTOU KORO

Ce chapitre présente les résultats de l'analyse de l'évolution des besoins hydriques dans le complexe sucrier, avant d'estimer ces besoins dans le futur pour la production de sucre. Les résultats de l'adéquation entre les besoins et la disponibilité sont ensuite présentés.

8.1. Analyse des besoins en eau dans le complexe sucrier de Borotou-Koro

8.1.1. Évolution mensuelle de l'ETP dans le bassin versant

La figure 99 présente l'évolution de l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle dans le bassin versant de 2000 à 2020. On constate que les valeurs mensuelles de l'ETP suivent la même évolution que celle des températures moyennes dans le bassin versant. La valeur la plus élevée d'ETP est enregistrée pendant le mois de mars (188,5 mm), tandis que la valeur la plus faible s'enregistre pendant le mois d'août (101,7 mm). Ces périodes correspondent respectivement à la période de sécheresse marquée par la présence de l'harmattan qui est un vent sec et chaud et à la saison des pluies. Ainsi, pendant les mois de novembre à avril, les besoins en eau des cannes augmentent considérablement et baissent pendant les autres mois de l'année.

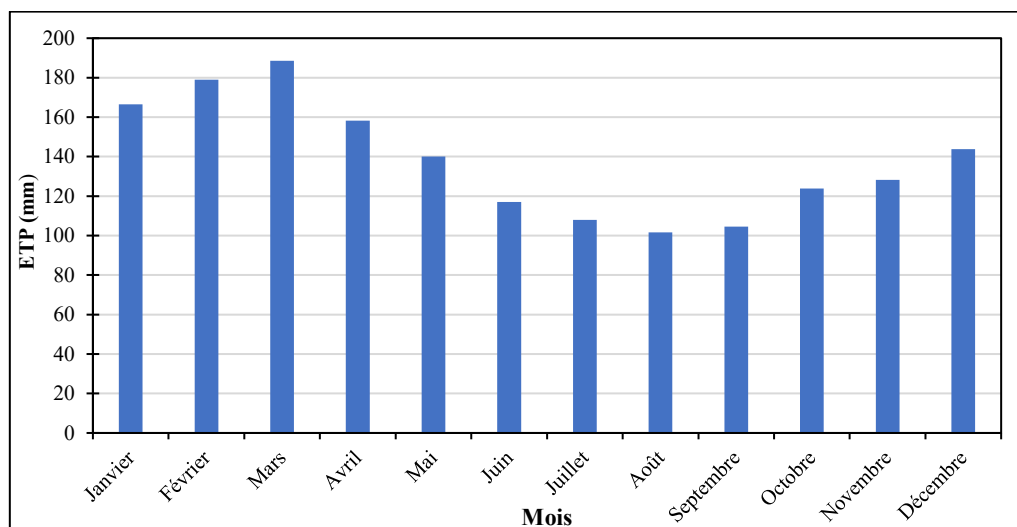


Figure 99: Évolution mensuelle de l'ETP dans le bassin versant de 2000 à 2020

8.1.2. Évolution annuelle de l'ETP dans le bassin versant

Le suivi annuel de l'ETP présenté à la figure 100, met en exergue l'effet de la sécheresse dans le bassin versant sur la période 2000-2020. On constate que sur la période de 2000 à 2008, le bassin versant a été marqué par une hausse des températures faisant atteindre les valeurs d'ETP à plus de 1800 mm. A partir de 2007, on observe une baisse de ces valeurs annuelles jusqu'en 2015, mais les valeurs restent en dessous de 1 500 mm. A partir de 2016 une hausse des valeurs

de l'ETP se fait remarquée, mais avec des valeurs en dessous de celle de la période de 2000 à 2008. Cette augmentation des valeurs d'ETP traduit les quantités d'eau mobilisables pour satisfaire les besoins en eau sur les parcelles de canne à sucre sur l'exploitation agricole.

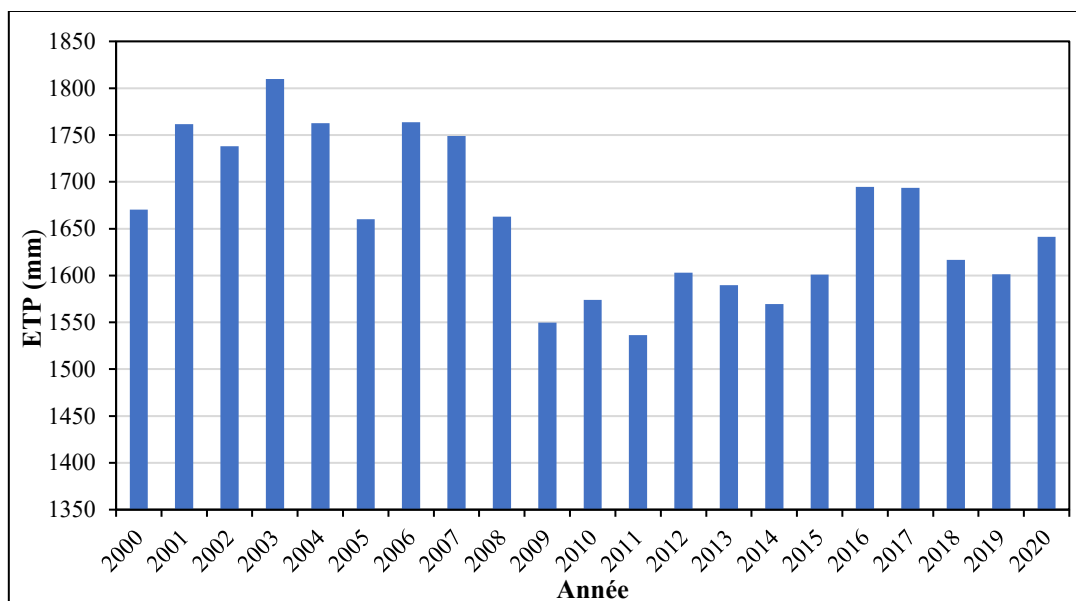


Figure 100 : Évolution annuelle de l'ETP dans le bassin versant de 2000 à 2020

8.1.3. Coefficient culturel

L'évolution des coefficients cultureux (K_c) de la canne à sucre, suivie mensuellement est présentée à la figure 101. Pour une parcelle de canne à sucre plantée en octobre comme présenté à la figure 97, la valeur maximale du coefficient culturel est atteinte entre mars et juillet. Cette période, peut varier en fonction de la date de planting des boutures de canne. Le K_c maximale reste invariable avec la valeur de 1,15. Dans le cas du cycle de développement de la canne à sucre, chaque K_c correspond à une étape de croissance de la culture. La phase de germination prend place après la mise en terre des bourgeons végétatifs. Les premières racines adventives issues de cette bouture sont progressivement remplacées par les racines de repousse plus épaisses et moins superficielles. En cette phase du développement, le K_c est 0,5. Après la germination, vient le tallage, qui est une multiplication des tiges permettant d'augmenter le rendement de la production. Il débute un mois après la plantation et peut durer jusqu'à 3 mois avec un K_c compris entre 0,7 et 0,9. La phase de croissance maximale et d'élongation commence juste après la phase de tallage et peut durer entre 4 et 6 mois dans une culture conduite sur 12 mois. Il s'agit du processus physiologique durant lequel se produit l'épaississement et l'allongement des tiges. La croissance est rapide, tant au niveau de la production de feuilles que de la croissance des talles. Au cours de cette phase, la demande en eau des plantes est élevée avec des K_c compris entre 1,1 et 1,15. Après cette étape, les plantes de canne à sucre amorcent leurs

maturations. En effet, une culture de canne à sucre entre en phase de maturation environ 2 mois avant la fin de son cycle de développement. En cette période, le K_c décroît entre 0,9 et 0,7. Le stress hydrique qui a lieu en fin de cycle favorisera la formation du sucre.

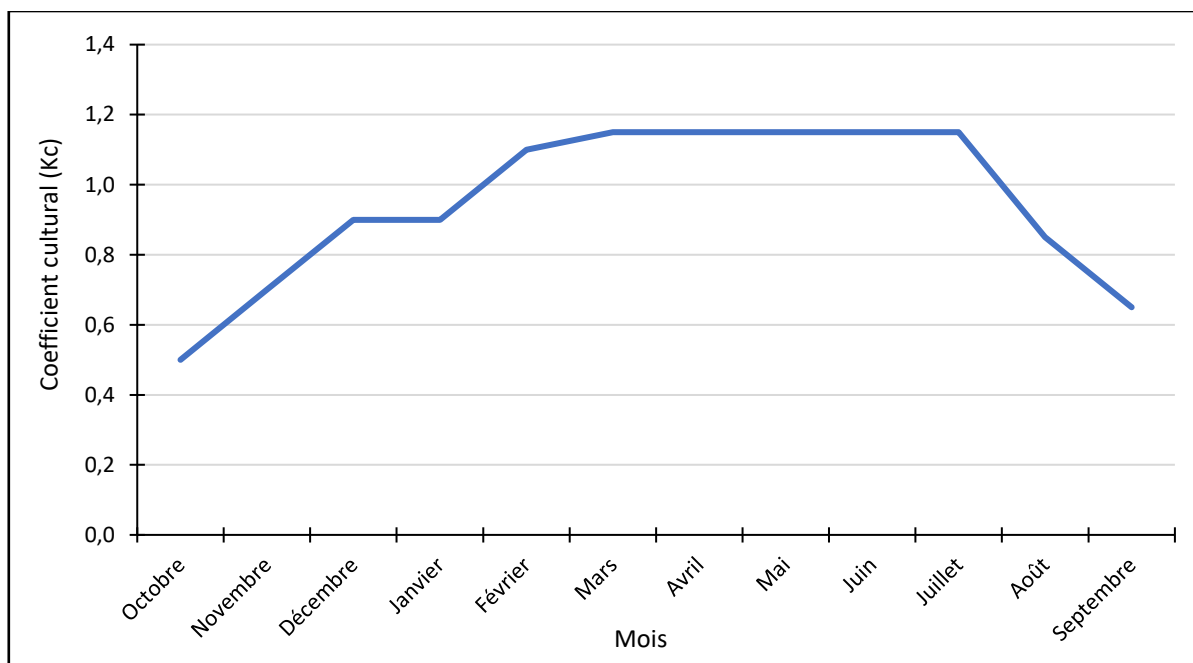


Figure 101 : Variation du coefficient cultural mensuel de la canne à sucre

8.1.4. Suivi des besoins en eau de la canne à sucre selon les stades phénologiques

L'évolution des besoins en eau de la canne à sucre en fonction des coefficients culturaux (K_c), est dans le tableau XLVIII. Les résultats consignés dans ce tableau, sont ceux d'une parcelle de canne à sucre plantée en octobre. A la phase de bourgeonnement qui dure un mois, le K_c est de 0,5. Le besoin en eau des plantules de cannes est estimé à 256 439 m³/mois. Les plantules de canne à sucre sont moins exigeantes en eau. Aux stades du tallage et de croissance qui correspondent à la multiplication des tiges de la canne, le K_c est compris entre 0,7 et 0,9. Les quantités d'eau pour la satisfaction des besoins hydriques de la canne sont respectivement de 340 423 et 919 913 m³/mois. La phase d'élongation qui commence après le tallage et la croissance dure 6 mois avec un K_c qui évolue de 1,1 à 1,6. Cette étape est exigeante et la plus consommatrice en eau. En effet, le moindre stress hydrique pourrait compromettre la qualité du rendement agricole et les besoins sont estimés à plus de 3 millions de mètre cube par mois. À la maturation qui est la dernière étape du cycle phénologique de la canne à sucre, les plantes deviennent moins exigeantes en eau. En cette période, le K_c décroît pour atteindre 0,7 et le stress hydrique qui a lieu favorise la formation du saccharose. Ainsi donc le besoin sera estimé 331 224 m³ pour une période d'un mois.

Tableau XLVIII : Évolution des besoins en eau de la canne en fonction des étapes phénologiques

| Phase phénologique | Mise en terre et bourgeonnement | Tallage | Croissance | Elongation | Maturation |
|---|---------------------------------|---------|------------|------------|------------|
| K_c | 0,5 | 0,7 | 0,9 | 1,1 - 1,15 | 0,7 |
| Durée (mois) | 1 | 1 | 3 | 6 | 1 |
| Besoin moyen en eau par campagne (m ³ /mois) | 256 439 | 340 423 | 919 913 | 3 182 908 | 331 224 |

8.1.5. Suivi des besoins de la canne selon la date de plantation ou de repousse

Le tableau XLIX présente l'évolution des besoins hydriques de la canne à sucre en fonction des dates de plantation ou de repousse des souches récoltées. Relativement à la date de planting ou de repousse, les besoins hydriques de la canne varient d'un mois à l'autre. Ainsi, selon les résultats consignés dans le tableau, lorsque le cycle cultural débute au mois de novembre et de décembre, le besoin en eau est estimé en moyenne à 5 millions de mètres. Par contre, pour un début de cycle pendant le mois de janvier, les besoins hydriques sont estimés à 2 956 125 m³ par campagne, car les stades phénologiques sont exigeants en eau (croissance et élongation) bénéficient des apports pluviométriques pour la satisfaction des leurs besoins hydriques. Lorsque le cycle de la canne débute de février à avril, les besoins par campagne sont estimés en moyenne à 3 millions de mètres cube d'eau. Il ressort de cette analyse que lorsque le cycle de la canne commence au premier trimestre de l'année, les apports en eau d'irrigation sont moins importants que lorsque le cycle débute après cette période.

Tableau XLIX : Besoins de la canne en fonction de la date de planting ou de repousse

| Planting ou repousse au mois de novembre | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------|------------|---------|---------|---------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Mois | Nov | Dec | Jan | Fev | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Aout | Sept | Oct |
| Kc | 0,5 | 0,7 | 1,1 | 1,1 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 0,85 | 0,65 |
| ETP (mm) | 102 | 115 | 133 | 144 | 150 | 126 | 113 | 95 | 86 | 81 | 83 | 99 |
| Pluie (mm) | 12 | 13 | 0 | 6 | 37 | 78 | 51 | 134 | 114 | 168 | 114 | 49 |
| Besoin (m ³) | 308 188 | 529 347 | 1146650 | 1189428 | 1063941 | 529965 | 619 512 | 0 | 0 | 0 | 0 | 122 847 |
| Total | 5 509 877 | | | | | | | | | | | |
| Planting ou repousse au mois de décembre | | | | | | | | | | | | |
| Mois | Dec | Jan | Fev | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Aout | Sept | Oct | Nov |
| Kc | 0,5 | 0,7 | 1,1 | 1,1 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 0,85 | 0,65 |
| ETP (mm) | 115 | 133 | 144 | 150 | 126 | 113 | 95 | 86 | 81 | 83 | 99 | 102 |
| Pluie (mm) | 13 | 0 | 6 | 37 | 78 | 51 | 134 | 114 | 168 | 114 | 49 | 17 |
| Besoin (m ³) | 341 845 | 714 345 | 1164421 | 983 938 | 518 823 | 606 488 | 0 | 0 | 0 | 0 | 271 860 | 375 506 |
| Total | 4 977 225 | | | | | | | | | | | |
| Planting ou repousse au mois de janvier | | | | | | | | | | | | |
| Mois | Jan | Fev | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Aout | Sept | Oct | Nov | Dec |
| Kc | 0,5 | 0,7 | 1,1 | 1,1 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 0,85 | 0,65 |
| ETP (mm) | 133 | 144 | 150 | 126 | 113 | 95 | 86 | 81 | 83 | 99 | 102 | 115 |
| Pluie (mm) | 0 | 6 | 37 | 78 | 51 | 134 | 114 | 168 | 114 | 49 | 17 | 1 |
| Besoin (m ³) | 308 178 | 437 527 | 594 278 | 284 122 | 366 306 | 0 | 0 | 0 | 0 | 301538 | 321375 | 342 801 |
| Total | 2 956 125 | | | | | | | | | | | |
| Planting ou repousse au mois de février | | | | | | | | | | | | |
| Mois | Fev | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Aout | Sept | Oct | Nov | Dec | Jan |
| Kc | 0,5 | 0,7 | 1,1 | 1,1 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 0,85 | 0,65 |
| ETP (mm) | 144 | 150 | 126 | 113 | 95 | 86 | 81 | 83 | 99 | 102 | 115 | 133 |
| Pluie (mm) | 6 | 37 | 78 | 51 | 134 | 114 | 168 | 114 | 49 | 17 | 1 | 0 |
| Besoin (m ³) | 435 510 | 451 452 | 406 168 | 486 322 | 0 | 0 | 0 | 0 | 431 066 | 662 228 | 642 337 | 572 726 |
| Total | 4 087 808 | | | | | | | | | | | |
| Planting ou repousse au mois de mars | | | | | | | | | | | | |
| Mois | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Aout | Sept | Oct | Nov | Dec | Jan | Fev |
| Kc | 0,5 | 0,7 | 1,1 | 1,1 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 0,85 | 0,65 |
| ETP (mm) | 150 | 126 | 113 | 95 | 86 | 81 | 83 | 99 | 102 | 115 | 133 | 144 |
| Pluie (mm) | 58 | 121 | 79 | 210 | 178 | 263 | 178 | 76 | 27 | 1 | 2 | 3 |
| Besoin (m ³) | 240 116 | 68 313 | 462 651 | 0 | 0 | 0 | 0 | 410 085 | 629 996 | 828 381 | 703 833 | 574 627 |
| Total | 3 918 002 | | | | | | | | | | | |
| Planting ou repousse au mois d'avril | | | | | | | | | | | | |
| Mois | Avr | Mai | Juin | Juil | Aout | Sept | Oct | Nov | Dec | Jan | Fev | Mars |
| Kc | 0,5 | 0,7 | 1,1 | 1,1 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 0,85 | 0,65 |
| ETP (mm) | 126 | 113 | 95 | 86 | 81 | 83 | 99 | 102 | 115 | 133 | 144 | 150 |
| Pluie (mm) | 78 | 51 | 134 | 114 | 168 | 114 | 49 | 17 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| Besoin (m ³) | 0 | 156 584 | 0 | 0 | 0 | 0 | 359 694 | 552 582 | 726 590 | 837 915 | 662 525 | 525 138 |
| Total | 3 821 028 | | | | | | | | | | | |
| Planting ou repousse au mois de mai | | | | | | | | | | | | |
| Mois | Mai | Juin | Juil | Aout | Sept | Oct | Nov | Dec | Jan | Fev | Mars | Avr |
| Kc | 0,5 | 0,7 | 1,1 | 1,1 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 0,85 | 0,65 |
| ETP (mm) | 113 | 95 | 86 | 81 | 83 | 99 | 102 | 115 | 133 | 144 | 150 | 126 |
| Pluie (mm) | 51 | 134 | 114 | 168 | 114 | 49 | 17 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 |
| Besoin (m ³) | 34 703 | 0 | 0 | 0 | 0 | 390 381 | 599 725 | 788 578 | 909 401 | 977 092 | 750 203 | 472 300 |
| Total | 4 922 382 | | | | | | | | | | | |

8.2. Consommation en eau dans le complexe sucrier de Borotou-Koro

8.2.1. Consommation mensuelle en eau par secteur d'activité

La consommation en eau dans les différents secteurs de l'exploitation sucrière est présentée à la figure 102 sur la période 2012-2020. On constate à partir des différentes stations de pompage que le secteur agricole B est le plus consommateur d'eau avec 2 948 643 m³, suivi respectivement des secteurs agricoles C (1 077 101 m³) et D (938 814 m³). La zone industrielle avec 311 360 m³ est la moins consommatrice en eau de tous les autres secteurs d'activités.

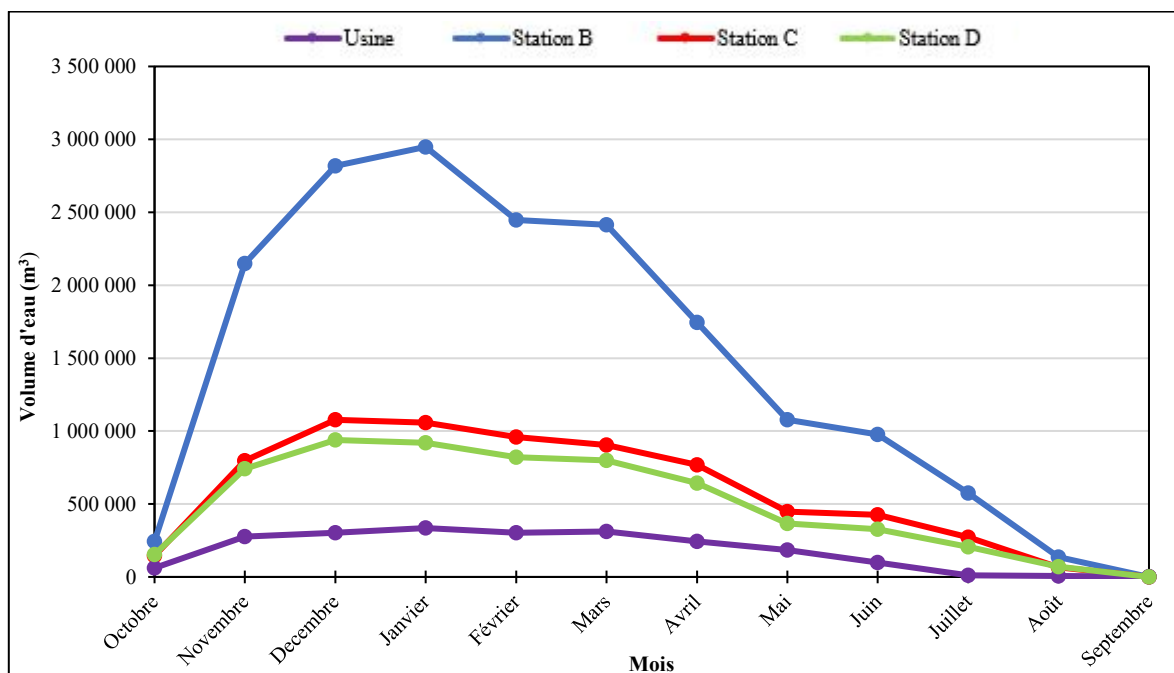


Figure 102 : Évolution de la consommation mensuelle d'eau par secteur agricole sur la période de 2012-2021

8.2.2. Eau d'irrigation par campagne dans les exploitations agricoles

Le suivi de la consommation mensuelle d'eau d'irrigation par campagne est illustré à la figure 103. L'analyse des graphes montrent que les pics en eau d'irrigation sont atteints à différents mois selon les campagnes agricoles. Les mois de pics partent de décembre à mars pour l'ensemble des campagnes agricoles. Pendant les campagnes de 2012-2013 et de 2019-2020, les pics de consommation ont été atteints aux mois de décembre et janvier avec respectivement 5 736 373 m³ et 6 431 170 m³. Par contre, la campagne agricole 2013-2014 a vu sa consommation maximale en eau atteinte au mois de mars avec 5 275 223 m³ d'eau consommée. Le mois de février a enregistré le pic de consommation de la campagne 2015-2016 avec 4 763 580 m³ d'eau. A côté de ces pics, on observe une fin généralisée de l'irrigation au mois de septembre, à l'exception des campagnes de 2018-2019 et 2019-2020.

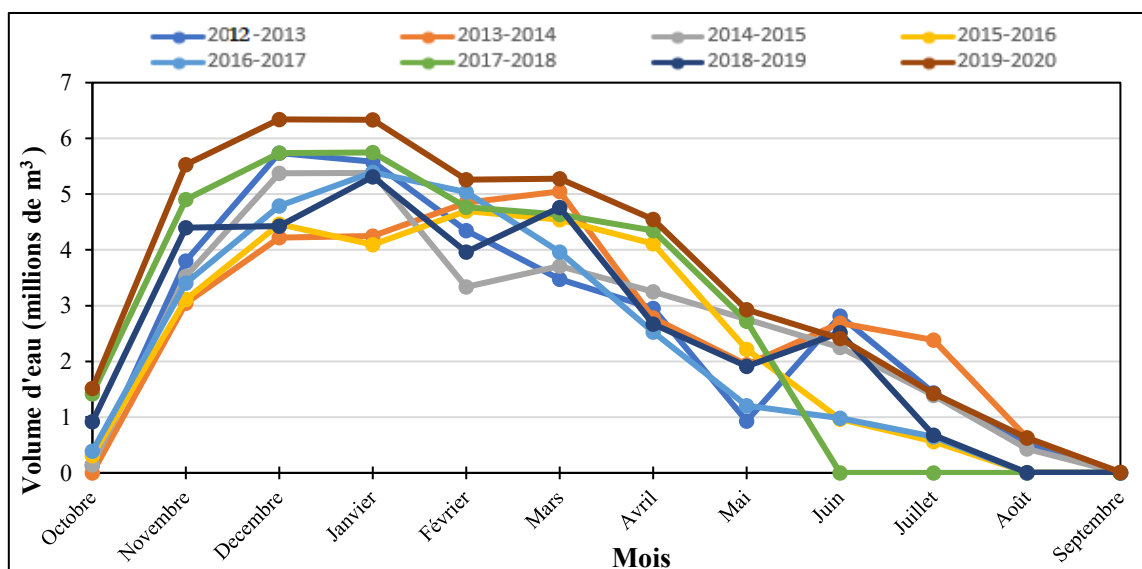


Figure 103 : Évolution de la consommation mensuelle en eau d’irrigation par campagne de 2012 à 2020.

8.2.3. Évolution de la consommation globale en eau d’irrigation par campagne entre 2012-2020

La consommation globale en eau d’irrigation sur la période 2012-2020 est présentée par la courbe de la figure 104. On observe pratiquement une consommation d’eau constante d’irrigation au cours des campagnes 2012-2013 à 2014-2015 qui est de 31 835 546 m³. Cette consommation constante est suivie d’une baisse de consommation d’eau pour les campagnes 2015-2016 et 2016-2017, avec respectivement 29 073 584 m³ et 28 341 686 m³. Après la campagne de 2016-2017, la consommation en eau d’irrigation a connu une hausse importante passant de 28 341 686 m³ à 42 197 480 m³ soit une augmentation de 13 855 794 m³. Cette hausse du volume d’eau consommée aux dernières campagnes est due à l’augmentation des superficies irriguées en vue d’améliorer la production de canne à sucre.

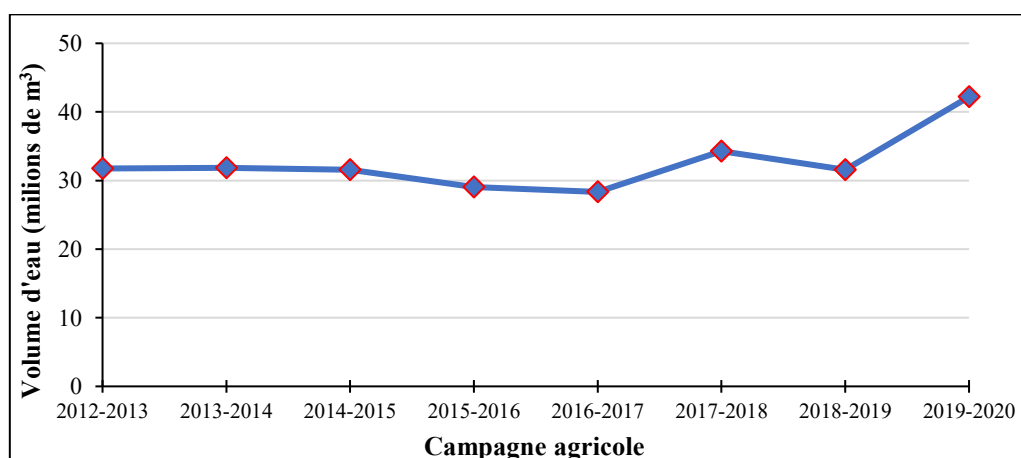


Figure 104 : Évolution de la consommation globale en eau d’irrigation par campagne de 2012 à 2020

L'analyse du tableau L permet de suivre les taux de variations des volumes d'eau consommés par campagne agricole au cours de l'irrigation. Les analyses montrent que les hausses les plus significatives sont de 21% et 34% survenues respectivement entre les campagnes 2016-2017 et 2017-2018 et les campagnes 2018-2019 et 2019-2020. Comparée aux années antérieures, la campagne de 2019-2020 fut la plus consommatrice en eau d'irrigation.

Tableau L: Taux de variation des volumes d'eau par campagne

| Campagne agricole | Volume d'eau consommé (m ³) | Taux de variation d'une campagne à la suivante (%) | Taux de variation des campagnes antérieures à la dernière (2019-2020) (%) |
|-------------------|---|--|---|
| 2012 - 2013 | 31 736 040,1 | - | -25 |
| 2013 - 2014 | 31 835 546,7 | 0 | -25 |
| 2014 - 2015 | 31 552 692,3 | -1 | -25 |
| 2015 - 2016 | 29 073 583,9 | -8 | -31 |
| 2016 - 2017 | 28 341 686,3 | -3 | -33 |
| 2017 - 2018 | 34 269 091,5 | 21 | -19 |
| 2018 - 2019 | 31 570 190,2 | -8 | -25 |
| 2019 - 2020 | 42 197 480,2 | 34 | - |

8.3. Détermination des besoins en eau futurs de la canne à sucre dans les exploitations agricoles de Borotou Koro

8.3.1. Impact du changement climatique sur l'ETP et la précipitation

La figure 105 présente les variations mensuelles de l'ETP et la pluie pour les modèles climatiques utilisés et le scénario d'émission RCP8.5 pour la période de temps de 2021 à 2060. Pour tous les modèles climatiques utilisés, l'ETP connaît une augmentation significative tous les mois de l'année. Les modèles ont tendance à sous-estimer les pertes d'eau pendant les mois de décembre à avril et à les surestimer pendant les mois de mai à novembre. La variabilité inter-mensuelle montre qu'avec tous les modèles de simulation, les pics d'évapotranspiration sont atteints au mois de mars avec des valeurs de 168,6 mm pour le modèle RACMO22T, 169,8 mm pour le modèle RCA4 et 169,0 mm pour REMO2009. Par contre, les valeurs minimales de l'ETP sont observées au mois de décembre pour tous les modèles avec des valeurs de 126,2 pour le modèle RACMO22T, 125,9 pour le modèle RCA4 et 126,9 pour le modèle REMO2009. Quant à la pluie, il est important de remarquer que sa variabilité est plus importante pour tous les modèles que celle de l'ETP. Pour le modèle RCA4, les quantités de pluie sont réduites pratiquement toute l'année alors que le modèle RACMO22T surestime les pluies pendant les mois de juin à août et les sous-estime tout le reste de l'année. Concernant le modèle REMO2009, la pluie représente parfaitement les saisons observées, sauf qu'il surestime les hauteurs de pluie d'avril à octobre. Pour la période 2021-2060, la pluie moyenne selon chaque

modèle est de 1041,4 mm pour le modèle RCA4, 1413,9 mm pour le modèle RACMO22T et 1981,5 mm pour REMO2009. Le modèle REMO2009 est le modèle où les pluies sont les plus significatives.

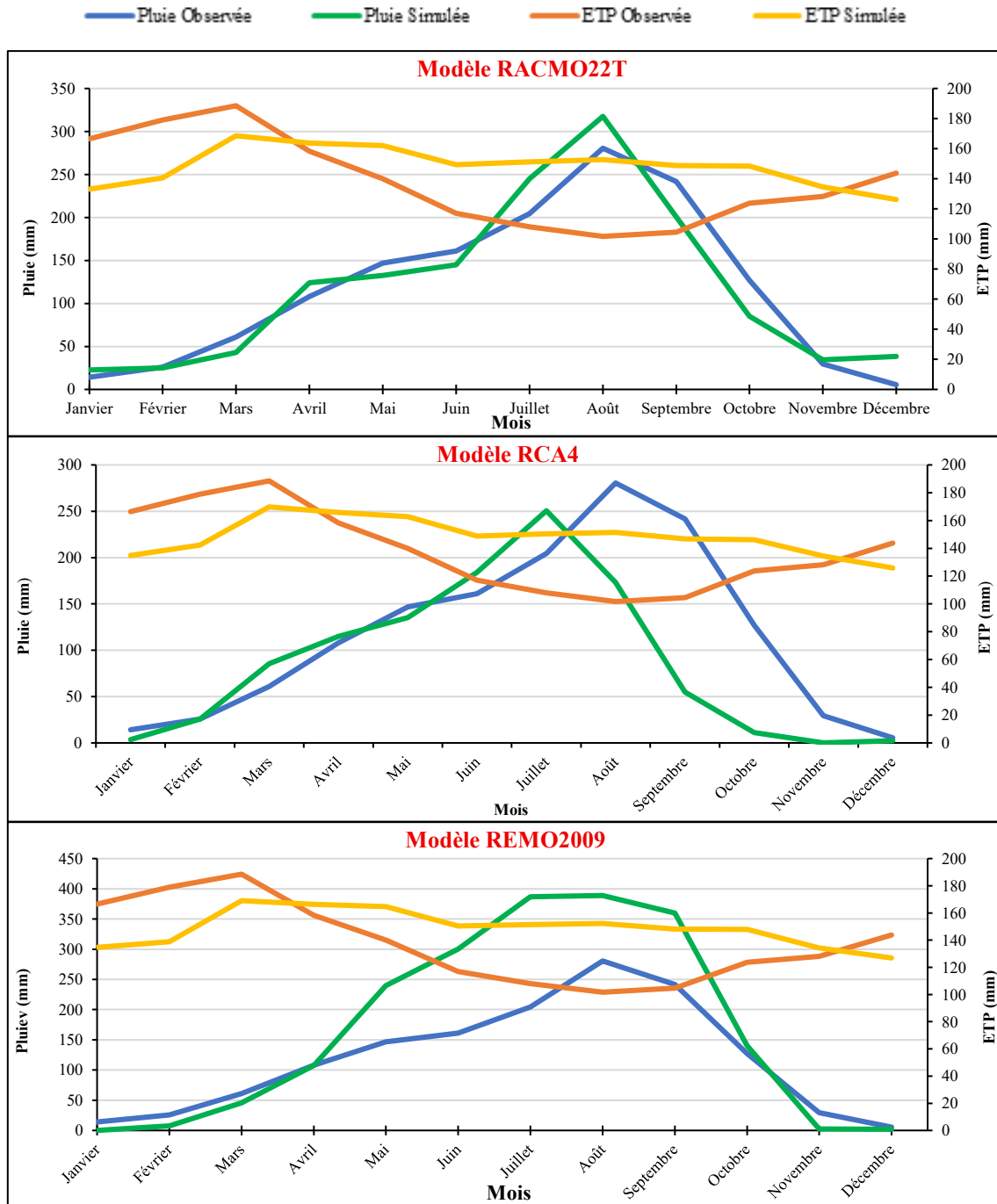


Figure 105 : Évolution des pluies et ETP mensuelles selon les modèles climatiques pour la période 2021-2060.

8.3.2. Évaluation mensuelle des besoins futurs de la canne à sucre selon les modèles climatiques

L'estimation future des besoins en eau de la canne à sucre dans les périmètres agricoles de Borotou-Koro est présentée par les figures 97, 98 et 99. L'évaluation des besoins de la canne à sucre dans l'exploitation agricole de Borotou-Koro s'est faite par modèle climatique, selon que la canne soit irriguée ou pluviale et par secteur agricole (B, C, D et E). Ainsi, selon le modèle RCA4 (Figure 106), pour les cannes irriguées, les besoins sont importants au mois d'octobre qui correspond au début de la campagne agricole. Les quantités d'eau estimées sont de 155 000 mm pour le secteur B et 5 623 mm et 4 790 mm respectivement pour les secteurs C et D. Les besoins moyens inter mensuels sont de 9 064 mm au secteur B, 3 622 mm au secteur C et 2 951 mm au secteur D. Dans tous les secteurs agricoles de l'exploitation, les plus faibles besoins en eau sont enregistrés au mois de juillet. Ces besoins sont de 1 144 mm, 1 669,6 mm et 3 411 mm respectivement pour le secteur B, C et D. Pour les cannes pluviales, les besoins en eau sont plus accentués sur la période d'octobre à mars et estimés à 8 510 mm au secteur E, 6 904 mm au secteur B, 4 702 mm au secteur C et 2 395 mm au secteur D. Au fur et à mesure de leurs évolutions, les besoins en eau de la canne diminuent dans tous les secteurs jusqu'à atteindre leurs valeurs les plus basses au mois de juillet comme pour les cannes irriguées. Ainsi à partir du mois de juillet, on constate une augmentation des besoins jusqu'en septembre. Les besoins moyens des cannes pluviales sont estimés à 6 492 mm au secteur E, 4 790 mm au secteur B, 3 454 mm au secteur C et enfin 1 803 mm au secteur D.

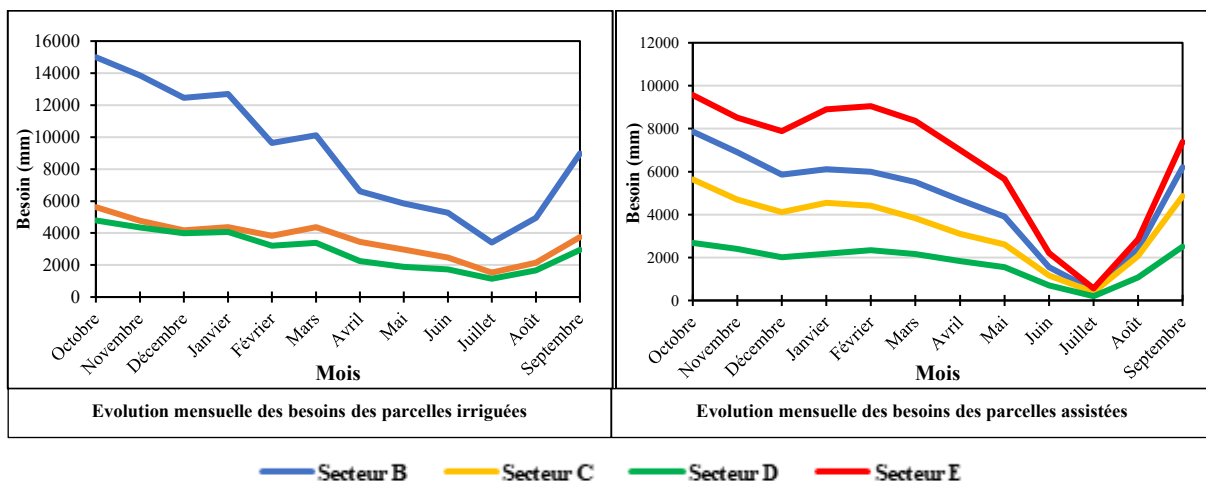


Figure 106 : Évolution mensuelle des besoins en eau selon le modèle RCA4 sur la période 2021-2060.

Par contre, pour les besoins du modèle REMO2009 présentés à la figure 107, les pics de demande d'eau des cannes irriguées sont atteints au mois de novembre. Ces besoins de la canne sont estimés à 15 972 mm pour le secteur B, 5 763 mm pour le secteur C et 5 164 mm en D.

Dans le suivi estimatif des besoins, on constate une baisse des besoins à partir du mois de mars et cette baisse se poursuit jusqu'au mois de septembre. Les besoins moyens à une année sont autour de 7 672 mm, 3 033 mm et 2 091 mm respectivement pour les secteurs B, C et D. Pour le modèle REMO2009, les besoins les plus faibles sont observés sur la période de juin à septembre et cette période correspond à la grande saison des pluies dans le bassin versant et ces besoins sont tous inférieurs à 2000 mm. Les courbes d'évolution mensuelle des besoins des cannes dites pluviales présentent une allure différente de celle des cannes irriguées pour le même modèle. En effet, les courbes de la figure permettant de suivre l'évolution des besoins montrent que les pics de besoins sont atteints au mois de mars suite à une longue période de forte demande, contrairement aux cannes irriguées. Ainsi, à partir du mois de mars, les besoins connaissent une diminution progressive et continue jusqu'en septembre où ils enregistrent leurs plus faibles valeurs. Les besoins maximaux en eau de la canne selon le modèle REMO2009 sont estimés à 10 768 mm pour le secteur E, 7 320 mm pour le secteur B, 5 384 mm au secteur C et enfin 2 996 mm pour le secteur D. Si les secteurs B, C et D ont des moyennes de besoins comprises entre 1572 mm et 3826 mm, le secteur E se démarque par un besoin moyen de 5 283 mm.

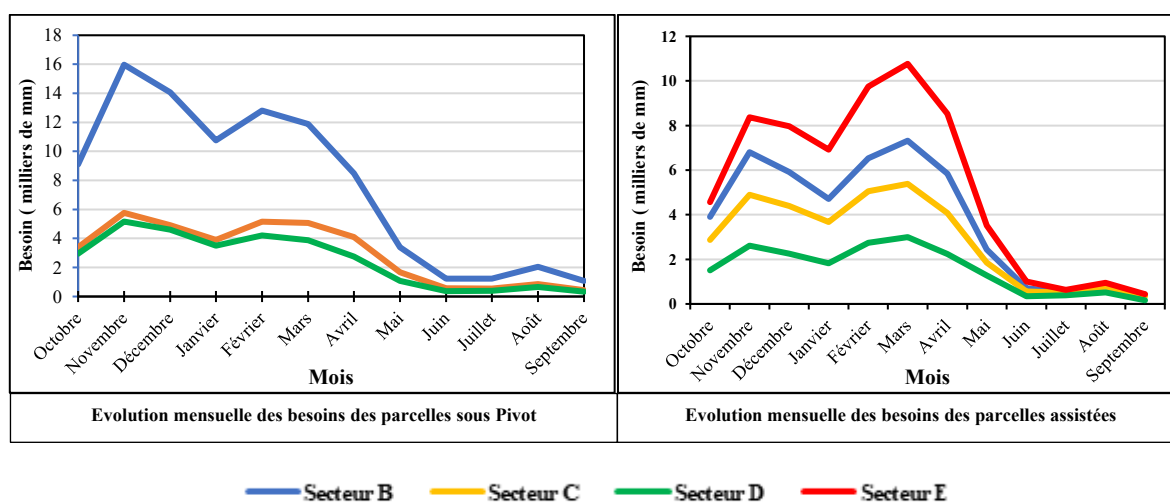


Figure 107: Évolution mensuelle des besoins futurs en eau selon le modèle REMO2009 sur la période 2021-2060.

Enfin, le modèle RACMO22TT à la figure 108, renseigne des pics de besoins des cannes irriguées au niveau des secteurs B et D se situent au mois de novembre avec respectivement 13 078 mm et 3 727 mm. Par ailleurs, le maximum de besoins du secteur C est atteint en mars avec 5 387 mm. Pour les trois secteurs agricoles de l'exploitation, les faibles besoins sont observés en août et les moyennes inter-mensuelles des besoins sont de 2 770 mm pour le secteur D, 8 518 mm pour le secteur B. Le modèle RACMO22T évalue les besoins des cannes pluviales

comme le modèle REMO2009. Les besoins suivent une croissance accentuée jusqu'au mois de mars où les pics de besoins sont atteints. Comme tout cycle végétatif, les besoins de la canne à sucre commencent à décroître jusqu'au mois d'août avec un léger rebondissement au mois de septembre. Les pics atteints sont estimés à 10 389 mm au secteur E, 6938 mm au secteur B, 4910 mm en C et 2759 mm au secteur D.

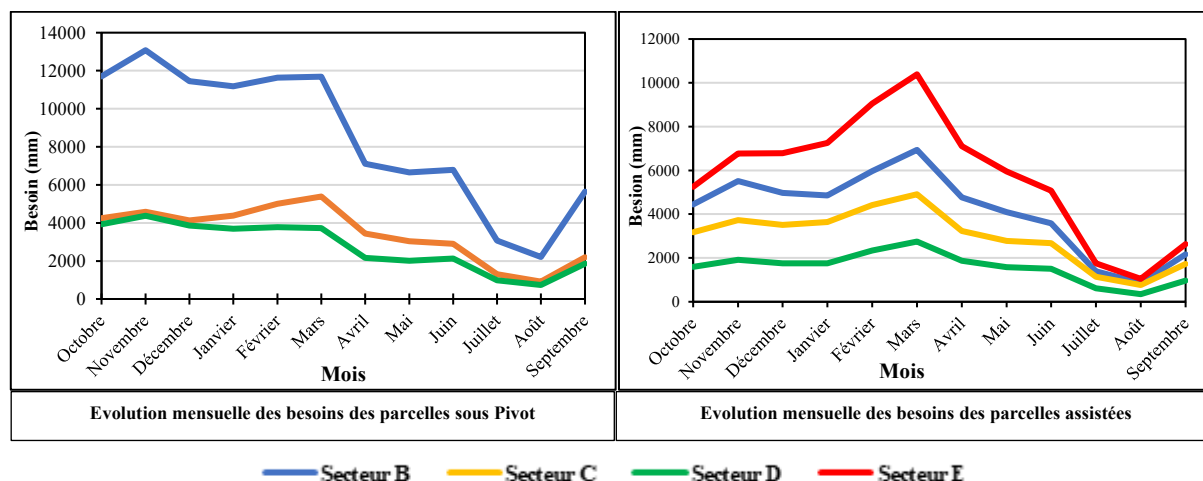


Figure 108 : Évolution mensuelle des besoins futurs en eau selon le modèle RACMO22T sur la période 2021-2060.

8.3.3. Évaluation des besoins futurs de la canne à sucre par campagne agricole

8.3.3.1. Prévision des besoins futurs de la canne à sucre selon le modèle RCA4

La figure 109 illustre l'estimation des besoins en eau de la canne à sucre selon le modèle climatique RCA4. En effet, d'une campagne à l'autre, les besoins de la canne à sucre varient soit à la hausse ou à la baisse. Les besoins en eau de la canne affichent une tendance généralisée à la hausse. Dans l'estimation des besoins, il ressort que les campagnes 2024-2025, 2033-2037, 2042-2045 et 2050-2057 seront des campagnes à fort besoin d'eau. Les besoins à ces campagnes pour les parcelles irriguées sont estimés à plus de 100 000 mm au secteur agricole B, 40 000 mm pour le secteur C et 30 000 mm au secteur D. Pour les parcelles assistées et celles à venir (secteur E), les besoins en eau pour la canne sont estimés à plus de 50 000 mm au secteurs B, 40 000 mm au secteur C, environ 20 000 mm au secteur D qui est plus le petit secteur et plus de 60 000 mm pour le secteur E (les parcelles futures). La campagne 2035-2036 sera marquée par un pic de besoin dans la secteur agricole D des parcelles assistées avec près de 100 000 mm d'eau à satisfaire.

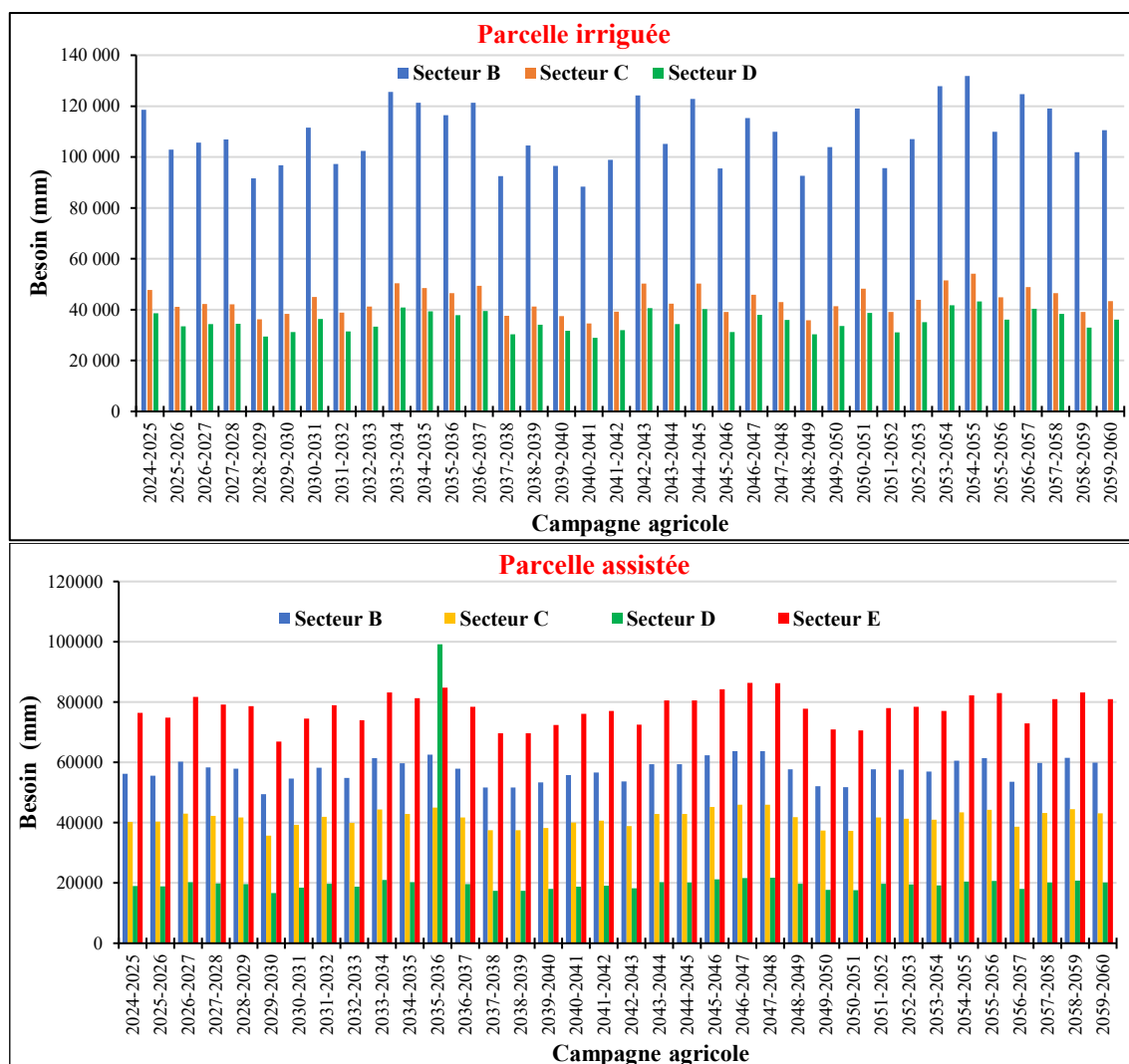


Figure 109 : Évolution des besoins futurs en eau par campagne selon le modèle RCA4 sur la période 2021-2060.

8.3.3.2. Prévision des besoins en eau de la canne à sucre selon le modèle REMO2009

La figure 110 présente l'estimation des besoins en eau de la canne à sucre selon le modèle climatique REMO2009. Selon ce modèle climatique, les besoins en eau des parcelles irriguées de canne à sucre, restent relativement stables dans les secteurs C et D de l'exploitation agricole. Par contre, le secteur B affiche des variations dans l'estimation des besoins. Dans les secteurs C et D, les besoins se situeront entre 30 000 et 35 000 mm et entre 20 000 et 26 000 mm respectivement. Le secteur agricole B, qui est plus vaste affiche les besoins les plus élevés de l'exploitation avec des valeurs comprises entre 80 000 mm et 110 000 mm. Dans l'ensemble, les campagnes 2034-2035 et 2056-2057 seront les plus marquées avec des pics de besoins de 109 380 mm et 113 748 mm. Les parcelles assistées et futures présentent une évolution des besoins similaires à celle observée pour le modèle RCA4. Pour ce modèle, le pic remarquable est observé à la campagne 2036-2037 avec 144 910 mm pour une seule campagne.

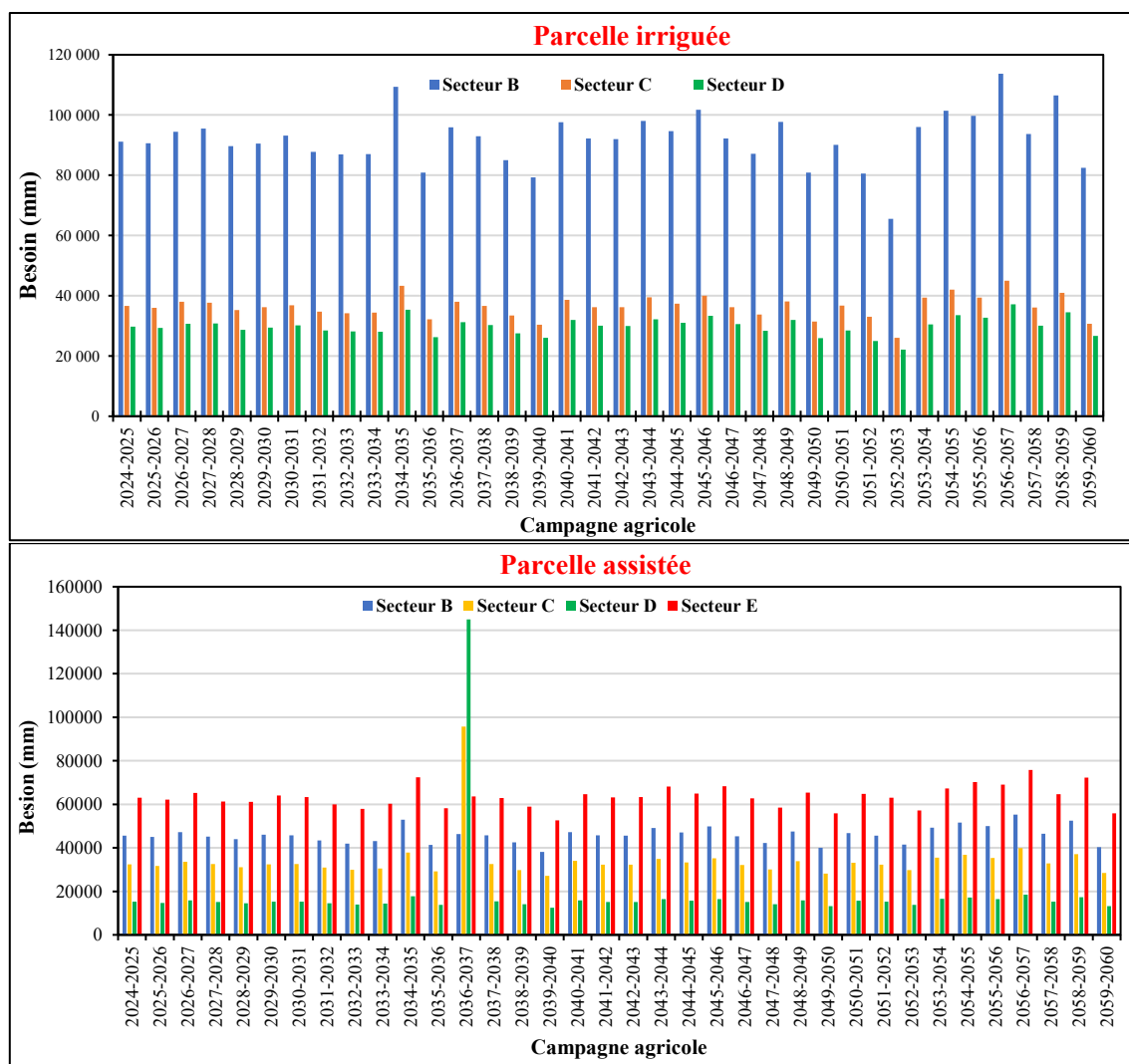


Figure 110 : Évolution des besoins futurs en eau par campagne selon le modèle REMO2009 sur la période 2021-2060.

8.3.3.3. Prévision des besoins en eau de la canne à sucre selon le modèle RACMO22T

Le suivi des besoins en eau futurs de la canne à sucre selon le modèle climatique RACMO22T est apprécié à la figure 111. On constate que, seul ce modèle prévoit des besoins futurs de la canne en baisse dans l’exploitation agricole. Pour les parcelles irriguées, les besoins au secteur B atteindront leurs pics à la campagne 2051-2052 avec un besoin de 127 669 mm. Les autres années de campagnes exprimeront des besoins maximaux compris entre 100 000 mm et 110 000 mm. Dans les secteurs C et D, les besoins évolueront graduellement, atteignant leurs pics chaque 5 ans. Pour l’ensemble de l’exploitation agricole, les campagnes 2031-2035, 2041-2045 et 2051-2057 connaîtront de fortes demandes en eau. Au niveau des parcelles assistées et celle à venir, l’évolution des besoins présente une toute autre allure.

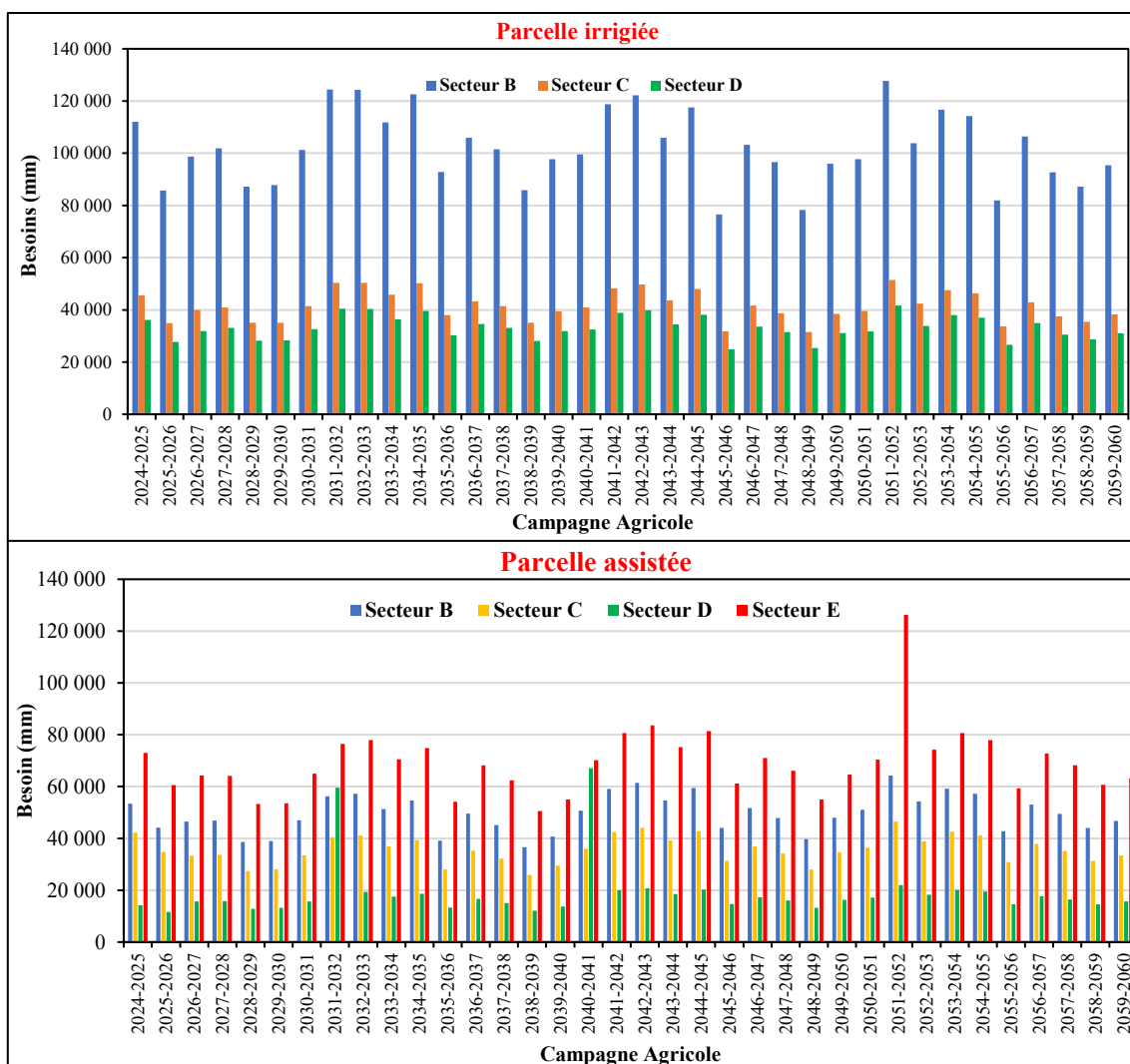


Figure 111 : Évolution des besoins futurs en eau par campagne selon le modèle RACMO22T sur la période 2021-2060.

Le tableau LI, présente les valeurs estimatives des besoins de la canne en fonction des différents modèles climatiques et selon que les parcelles de cannes soient irriguées ou assistées par secteur agricole dans le complexe sucrier de Borotou Koro.

Tableau LI : Synthèse des besoins futurs en eau par campagne agricole

| | Besoin en eau des cannes irriguées par campagne agricole (mm) | | | Taux de variation entre deux campagnes (%) | | Besoin en eau des cannes assistées par campagne agricole (mm) | | | Taux de variation entre deux campagnes (%) |
|------------------------|---|---------|---------|--|------------------------|---|--------|---------|--|
| | Minimal | Moyen | Maximal | | | Minimal | Moyen | Maximal | |
| Modèle RCA4 | | | | | Modèle RCA4 | | | | |
| Secteur B | 88 303 | 108 765 | 131 898 | 27 | Secteur B | 49 449 | 57 479 | 63 685 | 15 |
| Secteur C | 34 624 | 43 468 | 54 153 | 26 | Secteur C | 35 667 | 41 446 | 45 987 | 15 |
| Secteur D | 28 905 | 35 413 | 43 231 | 28 | Secteur D | 16 683 | 21 634 | 99 219 | 32 |
| Modèle REMO2009 | | | | | Modèle REMO2009 | | | | |
| Secteur B | 65 528 | 92 057 | 113 748 | 24 | Secteur B | 38 071 | 45 911 | 55 328 | 10 |
| Secteur C | 26 018 | 36 401 | 44 988 | 22 | Secteur C | 27 087 | 34 361 | 95 765 | 16 |
| Secteur D | 22 092 | 29 892 | 37 140 | 21 | Secteur D | 12 541 | 18 860 | 144 910 | 18 |
| Modèle RACMO22T | | | | | Modèle RACMO22T | | | | |
| Secteur B | 76 552 | 102 215 | 127 669 | 38 | Secteur B | 36 597 | 49 567 | 64 293 | 32 |
| Secteur C | 31 501 | 41 511 | 51 422 | 33 | Secteur C | 25 862 | 35 712 | 46 475 | 24 |
| Secteur D | 24 884 | 33 241 | 41 659 | 39 | Secteur D | 11 574 | 19 028 | 67 148 | 52 |
| | | | | | Secteur E | 50 611 | 69 070 | 126 247 | 57 |

8.4. Détermination des besoins futurs en eau dans le complexe sucrier de Borotou-Koro

8.4.1. Évaluation des besoins en eau futurs en eau selon le modèle RACMO22T sur la période 2021-2060

Le tableau LII présente l'estimation des besoins en eau dans le complexe sucrier de Borotou Koro selon le modèle RACMO22T. L'analyse du tableau montre qu'à l'horizon 2060, les besoins hydriques dans le complexe seront élevés pendant les mois d'octobre à mars. La quantification exprime 10 millions de m³ en moyenne par mois. Par contre, sur les mois d'avril à septembre, les besoins hydriques dans le complexe connaîtront une baisse avec la saison des pluies. Les besoins seront estimés à 5 millions de m³ par mois en moyenne. Le mois de novembre exprimera la plus forte demande en eau avec 13 681 595 m³, contrairement au mois d'août qui sera le moins demandeur d'eau avec 1 512 070 m³ d'eau.

Tableau LII : Estimation des besoins futurs en eau sur la période 2021-2060 selon le modèle RACMO22T

| Mois | Pivots (m ³ /mois) | Parcelle Assistée (m ³ /mois) | Secteur E (m ³ /mois) | Usine (m ³ /mois) | Eau potable (m ³ /mois) | Total |
|-----------|-------------------------------|--|----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|------------|
| Octobre | 3 784 760 | 1 038 207 | 2 135 396 | 2 811 471 | 274 662 | 10 044 497 |
| Novembre | 4 195 583 | 1 259 582 | 2 691 529 | 4 995 035 | 539 865 | 13 681 595 |
| Décembre | 3 694 866 | 1 170 382 | 2 684 695 | 3 077 291 | 618 878 | 11 246 112 |
| Janvier | 3 643 632 | 1 179 644 | 2 869 189 | 2 333 996 | 609 319 | 10 635 780 |
| Février | 3 860 084 | 1 444 906 | 3 619 178 | 2 084 416 | 549 557 | 11 558 141 |
| Mars | 3 916 811 | 1 628 317 | 4 177 953 | 2 308 662 | 587 403 | 12 619 146 |
| Avril | 2 384 719 | 1 069 688 | 2 879 412 | 554 970 | 557 890 | 7 446 679 |
| Mai | 2 192 900 | 880 045 | 2 439 922 | 579 615 | 489 185 | 6 581 667 |
| Juin | 2 217 302 | 796 835 | 2 109 867 | 1 594 529 | 1 490 975 | 8 209 507 |
| Juillet | 1 007 799 | 321 166 | 757 271 | 25 118 | 25 042 | 2 136 397 |
| Août | 727 235 | 205 191 | 447 368 | 89 000 | 43 277 | 1 512 070 |
| Septembre | 1 840 229 | 527 570 | 1 069 264 | 9 393 | 24 645 | 3 471 101 |

8.4.2. Évaluation des besoins en eau futurs selon le modèle RCA4 sur la période 2021-2060

Les résultats des besoins hydriques selon le modèle RCA4 sont présentés dans le tableau LIII. Selon les résultats du tableau, la période des besoins maximaux est comprise entre octobre et mars. Les estimations montrent qu'environ 11 millions de m³ devront être mobilisés pour satisfaire les besoins hydriques dans le complexe sucrier. Quant aux autres mois de l'année (avril-septembre) où les besoins seront en baisse par rapport à ceux d'octobre à mars, 5 millions de m³ devront être mobilisés pour satisfaire les besoins hydriques. Ainsi, le mois de novembre aura les besoins les plus élevés (14 951 199 m³) et le mois de juillet les besoins les plus bas (2 043 583 m³).

Tableau LIII : Estimation des besoins futurs en eau sur la période 2021-2060 selon le modèle RCA4

| Mois | Pivots (m ³ /mois) | Parcelle assistée (m ³ /mois) | Secteur E (m ³ /mois) | Usine (m ³ /mois) | Eau potable (m ³ /mois) | Total |
|------------------|-------------------------------|--|----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|------------|
| Octobre | 4 808 131 | 1 703 263 | 3 927 957 | 2 811 471 | 274 662 | 13 525 483 |
| Novembre | 4 364 411 | 1 625 864 | 3 426 023 | 4 995 035 | 539 865 | 14 951 199 |
| Décembre | 3 929 307 | 1 464 424 | 3 150 518 | 3 077 291 | 618 878 | 12 240 418 |
| Janvier | 4 039 699 | 1 560 030 | 3 553 406 | 2 333 996 | 609 319 | 12 096 451 |
| Février | 3 166 187 | 1 538 429 | 3 633 617 | 2 084 416 | 549 557 | 10 972 206 |
| Mars | 3 357 695 | 1 409 031 | 3 377 864 | 2 308 662 | 587 403 | 11 040 655 |
| Avril | 2 291 606 | 1 209 595 | 2 851 231 | 554 970 | 557 890 | 7 465 293 |
| Mai | 1 991 982 | 1 064 947 | 2 341 495 | 579 615 | 489 185 | 6 467 224 |
| Juin | 1 770 581 | 700 993 | 939 336 | 1 594 529 | 1 490 975 | 6 496 413 |
| Juillet | 1 144 995 | 601 352 | 247 075 | 25 118 | 25 042 | 2 043 583 |
| Août | 1 658 458 | 1 166 486 | 1 231 512 | 89 000 | 43 277 | 4 188 733 |
| Septembre | 2 964 343 | 2 209 011 | 3 087 901 | 9 393 | 24 645 | 8 295 293 |

8.4.3. Évaluation des besoins en eau futurs selon le modèle REMO2009 sur la période 2021-2060

Le tableau LIV présente l'estimation des besoins en dans le complexe à l'horizon 2050. Il ressort de l'analyse du tableau que comparativement aux deux autres modèles (RACMO22T et RCA4), la période de forte demande en eau partira de novembre à mars. Le besoin estimé sera d'environ 12 millions de m³ par mois. Bien que ce modèle prévoie une abondance des pluies dans le bassin versant, ces besoins restent quand même importants. Sur la période avril-octobre, les besoins hydriques mensuels se situeront entre 668 540 m³ et 8 765 654 m³. Le besoin maximal enregistré au mois de novembre est estimé à 15 612 737 m³, alors que le minimum enregistré au mois de septembre est de 668 540 m³.

Tableau LIV : Estimation des besoins futurs en eau sur la période 2021-2060 selon le modèle REMO2009

| Mois | Pivots (m ³ /mois) | Parcelle assistée (m ³ /mois) | Secteur E (m ³ /mois) | Usine (m ³ /mois) | Eau potable (m ³ /mois) | Total |
|-----------|----------------------------------|--|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|------------|
| Octobre | 2 926 673 | 918 167 | 1 872 995 | 2 811 471 | 274 662 | 8 803 968 |
| Novembre | 5 109 818 | 1 600 012 | 3 368 006 | 4 995 035 | 539 865 | 15 612 737 |
| Décembre | 4 498 870 | 1 427 341 | 3 180 615 | 3 077 291 | 618 878 | 12 802 995 |
| Janvier | 3 462 807 | 1 165 846 | 2 765 221 | 2 333 996 | 609 319 | 10 337 189 |
| Février | 4 209 416 | 1 618 516 | 3 924 243 | 2 084 416 | 549 557 | 12 386 148 |
| Mars | 3 915 513 | 1 744 691 | 4 367 095 | 2 308 662 | 587 403 | 12 923 363 |
| Avril | 2 863 832 | 1 315 270 | 3 473 692 | 554 970 | 557 890 | 8 765 654 |
| Mai | 1 138 368 | 578 657 | 1 454 480 | 579 615 | 489 185 | 4 240 305 |
| Juin | 402 441 | 160 021 | 425 943 | 1 594 529 | 1 490 975 | 4 073 908 |
| Juillet | 409 124 | 141 209 | 274 633 | 25 118 | 25 042 | 875 128 |
| Août | 667 937 | 216 439 | 413 138 | 89 000 | 43 277 | 1 429 791 |
| Septembre | 348 234 | 99 150 | 187 118 | 9 393 | 24 645 | 668 540 |

8.5. Analyse de la disponibilité de l'eau dans le bassin versant du complexe sucrier de Borotou-Koro

8.5.1. Analyse mensuelle de la disponibilité de l'eau sur la période 1970-2020

La disponibilité en eau dans le bassin versant sur la période 1970-2020 est présentée par le tableau LV. L'analyse montre qu'il s'écoule en moyenne 298 543 412 m³/mois à l'exutoire du bassin versant. Les volumes de pointe sont atteints au mois de septembre à plus d'un milliard de mètre cube. Par contre, les faibles écoulements sont enregistrés entre janvier et mai avec des volumes estimés à 51 541 493 m³. Ces débits expriment l'abondance de la ressource en eau de surface dans le bassin versant sur cette période.

Tableau LV : Disponibilité en eau dans le bassin versant sur la période 1970-2020

| Mois | Débit brut (m ³ /mois) | Débit réservé (m ³ /mois) | Débit prélevable (m ³ /mois) |
|-----------|--------------------------------------|---|--|
| Octobre | 683 444 070 | 68 344 407 | 615 099 663 |
| Novembre | 282 216 627 | 28 221 663 | 253 994 964 |
| Décembre | 117 159 530 | 11 715 953 | 105 443 577 |
| Janvier | 65 506 138 | 6 550 614 | 58 955 525 |
| Février | 37 353 306 | 3 735 331 | 33 617 975 |
| Mars | 32 279 724 | 3 227 972 | 29 051 752 |
| Avril | 44 482 930 | 4 448 293 | 40 034 637 |
| Mai | 78 085 370 | 7 808 537 | 70 276 833 |
| Juin | 121 665 680 | 12 166 568 | 109 499 112 |
| Juillet | 290 421 002 | 29 042 100 | 261 378 902 |
| Août | 745 107 636 | 74 510 764 | 670 596 872 |
| Septembre | 1 084 798 933 | 108 479 893 | 976 319 040 |

8.5.2. Analyse décadaire de la disponibilité de l'eau en période de basse eau sur la période 1970-2020

Le tableau LVI présente les résultats du suivi décadaire des écoulements pendant la période de basse eau (décembre à mai) dans le bassin versant. L'analyse montre que la disponibilité de

l'eau (débit prélevable) pendant cette période enregistre une moyenne de 25 645 605 m³/décade. Les écoulements les plus faibles, sont observés principalement à partir de la 2^{ème} décade de janvier jusqu'à la 2^{ème} décade de février avec un débit de 13 millions de mètre cube par décade. On observe aussi des débits bas pendant les deux dernières décades de mai. Cette approche montre la disponibilité de l'eau dans le bassin versant malgré la période de basse eau.

Tableau LVI : Disponibilité décadaire de l'eau dans le bassin versant en période de basse eau sur la période 1970-2020

| Mois | Décade | Débit brut (m ³ /décade) | Débit réservé (m ³ /décade) | Débit prélevable (m ³ /décade) |
|----------|--------|-------------------------------------|--|---|
| Décembre | D1 | 32 736 960 | 327 3696 | 29 463 264 |
| | D2 | 27 154 562 | 2 715 456 | 24 439 106 |
| | D3 | 17 657 280 | 176 5728 | 15 891 552 |
| Janvier | D1 | 19 452 227 | 1 945 222 | 17 507 005 |
| | D2 | 15 109 343 | 1 510 934 | 13 598 408 |
| | D3 | 15 274 609 | 1 527 460 | 13 747 148 |
| Février | D1 | 14 334 732 | 1 433 473 | 12 901 259 |
| | D2 | 15 056 781 | 1 505 678 | 13 551 103 |
| | D3 | 23 430 307 | 2 343 030 | 21 087 276 |
| Mars | D1 | 23 305 514 | 2 330 551 | 20 974 963 |
| | D2 | 19 002 940 | 1 900 294 | 17 102 646 |
| | D3 | 18 105 194 | 1 810 519 | 16 294 674 |
| Avril | D1 | 37 876 097 | 3 787 609 | 34 088 487 |
| | D2 | 35 299 715 | 3 529 971 | 31 769 743 |
| | D3 | 88 426 955 | 8 842 695 | 79 584 259 |
| Mai | D1 | 79 235 528 | 7923552 | 71 311 975 |
| | D2 | 15 848 640 | 1584864 | 14 263 776 |
| | D3 | 15 604 731 | 1560473 | 14 044 258 |

8.5.3. Disponibilité de l'eau dans le bassin versant à l'horizon 2060

8.5.3.1. Analyse de la disponibilité de l'eau selon le modèle RACMO22T

La tableau LVII, présente l'estimation de la disponibilité en eau dans le bassin versant selon le modèle RACMO22T, sous les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5. L'analyse montre que sous le scénario RCP4.5, les mois de février et mars présenteront les plus faibles débits d'écoulement mensuel. Ces écoulements seront compris entre 51 millions et 87 millions de mètre cube par mois. Les autres mois de l'année, les écoulements seront supérieurs à 100 millions de mètres cube atteignant même 1 milliard de mètre cube au mois d'août. Sous le scénario RCP8.5, les débits les plus faibles seront produits au cours des mois de janvier et février avec des volumes compris entre 47 millions et 74 millions de mètre cube. Pour les autres mois, on assistera à des écoulements supérieurs à 100 millions de mètre cube. Avec une baisse des écoulements maintenue toujours au mois de septembre (573 156 000 m³/mois).

Tableau LVII : Estimation de la disponibilité en eau dans le bassin versant selon le modèle RACMO22T

| Mois | RCP4.5 | | | RCP8.5 | | |
|------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| | Débit brut (m ³ /mois) | Débit réservé (m ³ /mois) | Débit prélevable (m ³ /mois) | Débit brut (m ³ /mois) | Débit réservé (m ³ /mois) | Débit prélevable (m ³ /mois) |
| Octobre | 423 214 089 | 42 321 409 | 380 892 680 | 289 072 800 | 28 907 280 | 260 165 520 |
| Novembre | 149 776 452 | 14 977 645 | 134 798 807 | 110 626 560 | 11 062 656 | 99 563 904 |
| Décembre | 279 953 893 | 27 995 389 | 251 958 504 | 285 074 640 | 28 507 464 | 256 567 176 |
| Janvier | 150 525 049 | 15 052 505 | 135 472 544 | 74 694 960 | 7 469 496 | 67 225 464 |
| Février | 51 851 565 | 5 185 157 | 46 666 409 | 47 213 280 | 4 721 328 | 42 491 952 |
| Mars | 87 025 459 | 8 702 546 | 78 322 913 | 111 896 640 | 11 189 664 | 100 706 976 |
| Avril | 161 963 561 | 16 196 356 | 145 767 205 | 164 306 880 | 16 430 688 | 147 876 192 |
| Mai | 263 554 894 | 26 355 489 | 237 199 405 | 170 935 920 | 17 093 592 | 153 842 328 |
| Juin | 311 650 718 | 31 165 072 | 280 485 647 | 187 816 320 | 18 781 632 | 169 034 688 |
| Juillet | 479 591 134 | 47 959 113 | 431 632 020 | 304 488 720 | 30 448 872 | 274 039 848 |
| Août | 1 151 681 934 | 115 168 193 | 1 036 513 741 | 719 824 320 | 71 982 432 | 647 841 888 |
| Septembre | 963 002 045 | 96 300 204 | 866 701 840 | 573 156 000 | 57 315 600 | 515 840 400 |

8.5.3.2. Analyse de la disponibilité de l'eau selon le modèle RCA4

Les résultats de la disponibilité en eau selon le modèle climatique RCA4 sont présentés dans le tableau LVIII. Les observations montrent que sous le scénario RCP4.5, les mois de novembre et janvier présenteront les écoulements les plus faibles compris entre 70 millions et 80 millions de mètre cube. Les débits de pointe seront observés au mois d'août avec plus d'un milliard de mètre cube. Alors que sous le scénario RCP8.5, les débits les plus faibles seront enregistrés sur la période novembre-mars. Les débits attendus seront compris en moyenne entre 15 millions et 50 millions de mètre cube. Quant aux débits de pointe, ils surviendront pendant les mois de juillet et août avec les volumes supérieurs à 1 milliard de mètre cube.

Tableau LVIII : Estimation de la disponibilité en eau dans le bassin versant selon le modèle RCA4

| Mois | RCP45 | | | RCP85 | | |
|------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| | Débit brut (m ³ /mois) | Débit réservé (m ³ /mois) | Débit prélevable (m ³ /mois) | Débit brut (m ³ /mois) | Débit réservé (m ³ /mois) | Débit prélevable (m ³ /mois) |
| Octobre | 184 855 963 | 18 485 596 | 166 370 367 | 154 558 190 | 15 455 819 | 139 102 371 |
| Novembre | 87 507 864 | 8 750 786 | 78 757 078 | 57 179 941 | 5 717 994 | 51 461 947 |
| Décembre | 134 839 498 | 13 483 950 | 121 355 548 | 28 905 200 | 2 890 520 | 26 014 680 |
| Janvier | 76 637 518 | 7 663 752 | 68 973 766 | 15 972 468 | 1 597 247 | 14 375 222 |
| Février | 225 292 943 | 22 529 294 | 202 763 649 | 15 906 352 | 1 590 635 | 14 315 717 |
| Mars | 219 784 533 | 21 978 453 | 197 806 079 | 53 722 482 | 5 372 248 | 48 350 234 |
| Avril | 233 941 219 | 23 394 122 | 210 547 097 | 149 908 460 | 14 990 846 | 134 917 614 |
| Mai | 380 070 134 | 38 007 013 | 342 063 120 | 280 949 775 | 28 094 978 | 252 854 798 |
| Juin | 556 693 798 | 55 669 380 | 501 024 418 | 463 516 193 | 46 351 619 | 417 164 574 |
| Juillet | 832 136 244 | 83 213 624 | 748 922 620 | 1 114 871 981 | 111 487 198 | 1 003 384 783 |
| Août | 1 004 107 574 | 100 410 757 | 903 696 817 | 1 337 768 899 | 133 776 890 | 1 203 992 009 |
| Septembre | 580 742 600 | 58 074 260 | 522 668 340 | 541 409 843 | 54 140 984 | 487 268 859 |

8.5.3.3. Analyse de la disponibilité de l'eau selon le modèle REMO2009

Les débits issus du modèle REMO2009 sont présentés dans le tableau LIX. Ces débits expriment l'abondance de la ressource en eau pour l'irrigation des parcelles de cannes et autres besoins en eau dans le complexe sucrier. Sous le scénario RCP4.5, les débits de pointe sont sur 4 mois de l'année (octobre, juillet, août et septembre) allant des 1 milliard à 2 milliards de mètre cube. Par contre, les faibles débits seront circonscrits entre janvier et mars. Sous le scénario RCP8.5, les débits de pointe seront enregistrés des mois de juin à octobre (5 mois), alors que les faibles débits sont enregistrés de janvier à mars avec des écoulements estimés en moyenne à 50 millions de mètre cube. L'ensemble des trois modèles présentent des quantités importantes de volumes prélevables pour les besoins en eau dans le complexe sucrier tous les mois de l'année.

Tableau LIX : Estimation de la disponibilité en eau dans le bassin versant selon le modèle REMO2009

| Mois | RCP4,5 | | | RCP8,5 | | |
|------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| | Débit brut (m ³ /mois) | Débit réservé (m ³ /mois) | Débit prélevable (m ³ /mois) | Débit brut (m ³ /mois) | Débit réservé (m ³ /mois) | Débit prélevable (m ³ /mois) |
| Octobre | 1 209 752 736 | 120 975 274 | 1 088 777 463 | 1 455 848 818 | 145 584 882 | 1 310 263 936 |
| Novembre | 205 676 539 | 20 567 654 | 185 108 885 | 225 736 740 | 22 573 674 | 203 163 066 |
| Décembre | 104 715 650 | 10 471 565 | 94 244 085 | 75 088 411 | 7 508 841 | 67 579 570 |
| Janvier | 57 632 096 | 5 763 210 | 51 868 886 | 39 427 926 | 3 942 793 | 35 485 133 |
| Février | 28 391 346 | 2 839 135 | 25 552 211 | 22 872 107 | 2 287 211 | 20 584 897 |
| Mars | 55 652 686 | 5 565 269 | 50 087 417 | 32 696 011 | 3 269 601 | 29 426 410 |
| Avril | 134 406 346 | 13 440 635 | 120 965 711 | 74 149 960 | 7 414 996 | 66 734 964 |
| Mai | 374 855 625 | 37 485 563 | 337 370 063 | 440 636 279 | 44 063 628 | 396 572 651 |
| Juin | 917 446 306 | 91 744 631 | 825 701 675 | 1 071 144 788 | 107 114 479 | 964 030 310 |
| Juillet | 1 882 333 947 | 188 233 395 | 1 694 100 553 | 1 905 396 194 | 190 539 619 | 1 714 856 575 |
| Août | 2 672 733 745 | 267 273 375 | 2 405 460 371 | 2 672 144 264 | 267 214 426 | 2 404 929 837 |
| Septembre | 2 424 080 412 | 242 408 041 | 2 181 672 371 | 2 725 304 983 | 272 530 498 | 2 452 774 485 |

8.6. Adéquation entre la disponibilité et le besoin en eau dans le complexe sucrier de Borotou-Koro

8.6.1. Analyse besoin-disponibilité en eau sur la période 2005 -2020

La figure 112 présente les histogrammes de comparaison entre le besoin et la disponibilité en eau dans le complexe sucrier de Borotou-Koro. Dans le complexe sucrier, les besoins d'irrigation de la canne à sucre présentent une tendance à la hausse et une forte variabilité interannuelle. La satisfaction de la demande en eau paraît ainsi sensible face à la variabilité hydroclimatique. Néanmoins les améliorations d'efficacité du réseau de l'irrigation dans le complexe sucrier ont contribué à limiter les déficits. Ainsi, un équilibre quantitatif apparaît malgré l'augmentation de la demande agricole et la baisse des débits naturels. Le suivi mensuel fait remarquer que les besoins en eau d'irrigation et de production de sucre sont largement

satisfaits. Même la période de basse eau, qui est un moment critique dans le régime des écoulements présente une satisfaction des besoins avec une large quantité excédante d'eau sur toute la période 2005-2020.

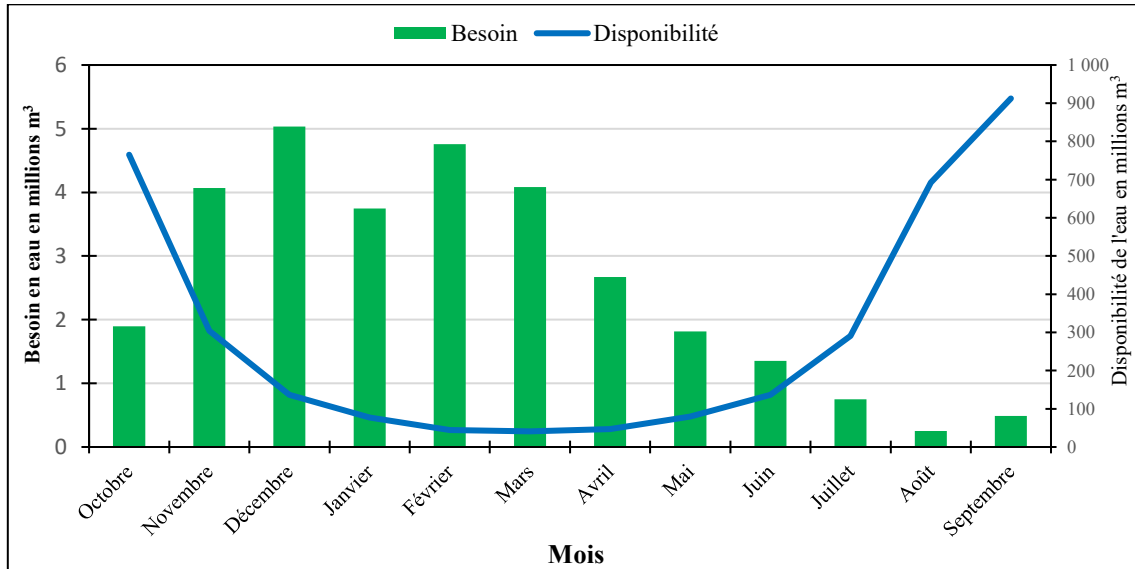


Figure 112 : Comparaison besoin et disponibilité de l'eau dans le complexe sucrier de Borotou Koro sur la période 2005-2020.

8.6.2. Analyse besoin-disponibilité en eau à l'horizon 2060

8.6.2.1. Rapport entre les besoins et la disponibilité de l'eau selon le modèle RACMO22T

La figure 113 présente le rapport entre les besoins futurs du complexe sucrier et la disponibilité en eau dans le bassin versant sous les scénarios RCP4.5 (Figure 113a) et RCP8.5 (Figure 113b). Le scénario RCP4.5 montre que les besoins en eau du complexe sucrier estimés à 99 142 692 m³/campagne (Tableau LII) seront satisfaits par les apports d'eau qui sont estimés à environ 327 672 048 m³/mois (Tableau LVII) en moyenne. Le scénario RCP8.5 le plus pessimiste, prévoit aussi une satisfaction des besoins à l'égard des volumes qui seront générés dans le bassin versant dont la moyenne par mois est estimée à 337 095 740 m³/mois. L'analyse des graphes fait remarquer que les besoins envisagés sont très négligeables devant les volumes d'eau qui seront produits dans le bassin versant aux horizons futurs.

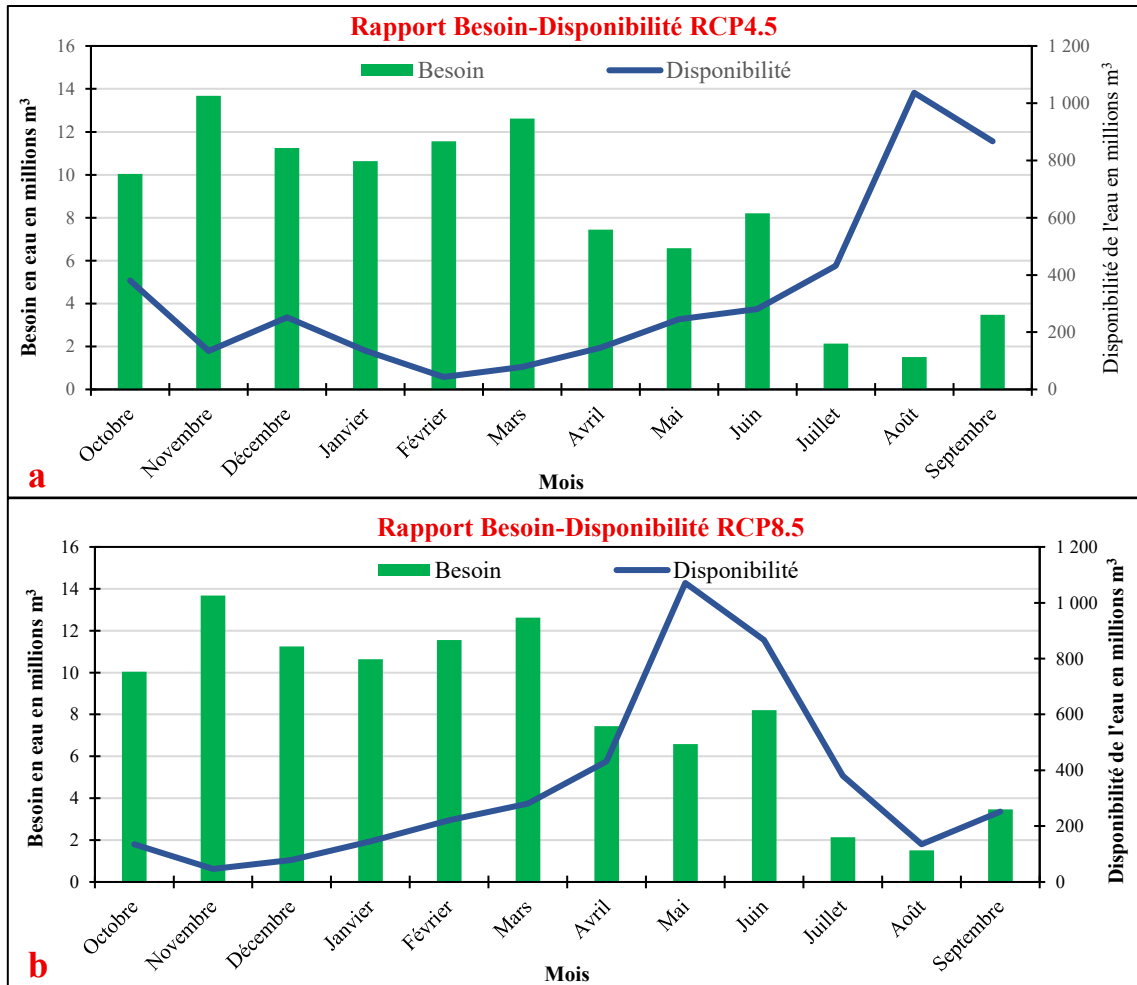


Figure 113: Rapport besoins et disponibilité en eau selon les scénarios RCP4.5 (a) et RCP8.5 (b) du modèle RACMO22T

8.6.2.2. Rapport entre les besoins et la disponibilité de l’eau selon le modèle RCA4

La figure 114 présente les résultats du rapport de comparaison entre les besoins et la disponibilité de l’eau selon le modèle RCA4 sous deux scénarios RCP4.5 (Figure 114a) et RCP8.5 (Figure 114b). Selon les deux scénarios, les besoins en eau du complexe sucrier resteront largement inférieurs voire même négligeables devant la disponibilité dans le bassin versant aux horizons 2040 et 2060 comme le présentent les graphes de la figure 109. Les besoins totaux des campagnes estimés en moyenne à 109 782 950 m³ par campagne (Tableau LIII) sont inférieurs à la disponibilité moyenne mensuelle qui est estimée 666 149 596 m³ (RCP4.5) et 622 511 577 m³ (RCP8.5) selon le tableau LVIII.

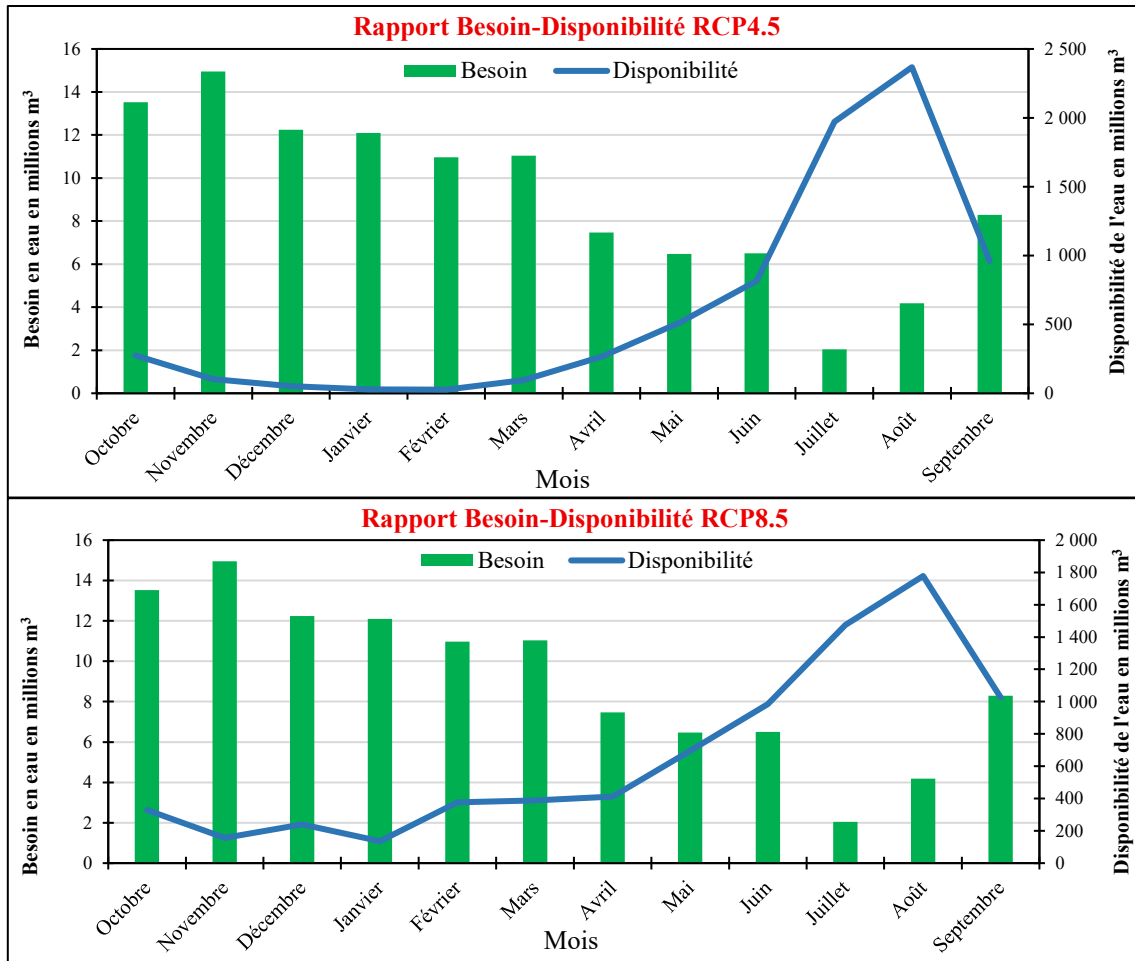


Figure 114: Rapport besoins et disponibilité en eau selon les scénarios RCP4.5 (a) et RCP8.5 (b) du modèle RCA4

8.6.2.3. Rapport entre les besoins et la disponibilité de l'eau selon le modèle REMO2009

La figure 115 montre le niveau de satisfaction des besoins en eau pendant tous les mois de l'année dans le complexe sucrier selon le modèle REMO2009. Les scénarios RCP4.5 (Figure 115a) et RCP8.5 (Figure 115b) prévoient des disponibilités de plus de 1 milliard de mètre cube après la satisfaction des besoins mensuels (Tableau LIV) et ceux pour les mois de pics de consommation et pendant la période de basse eau. L'analyse des graphes de la figure 110 montre que les besoins aux horizons 2040 et 2060 (Tableau LIX) seront largement satisfaits et ceux même si les besoins venaient à augmenter pour d'autres usages à l'avenir.

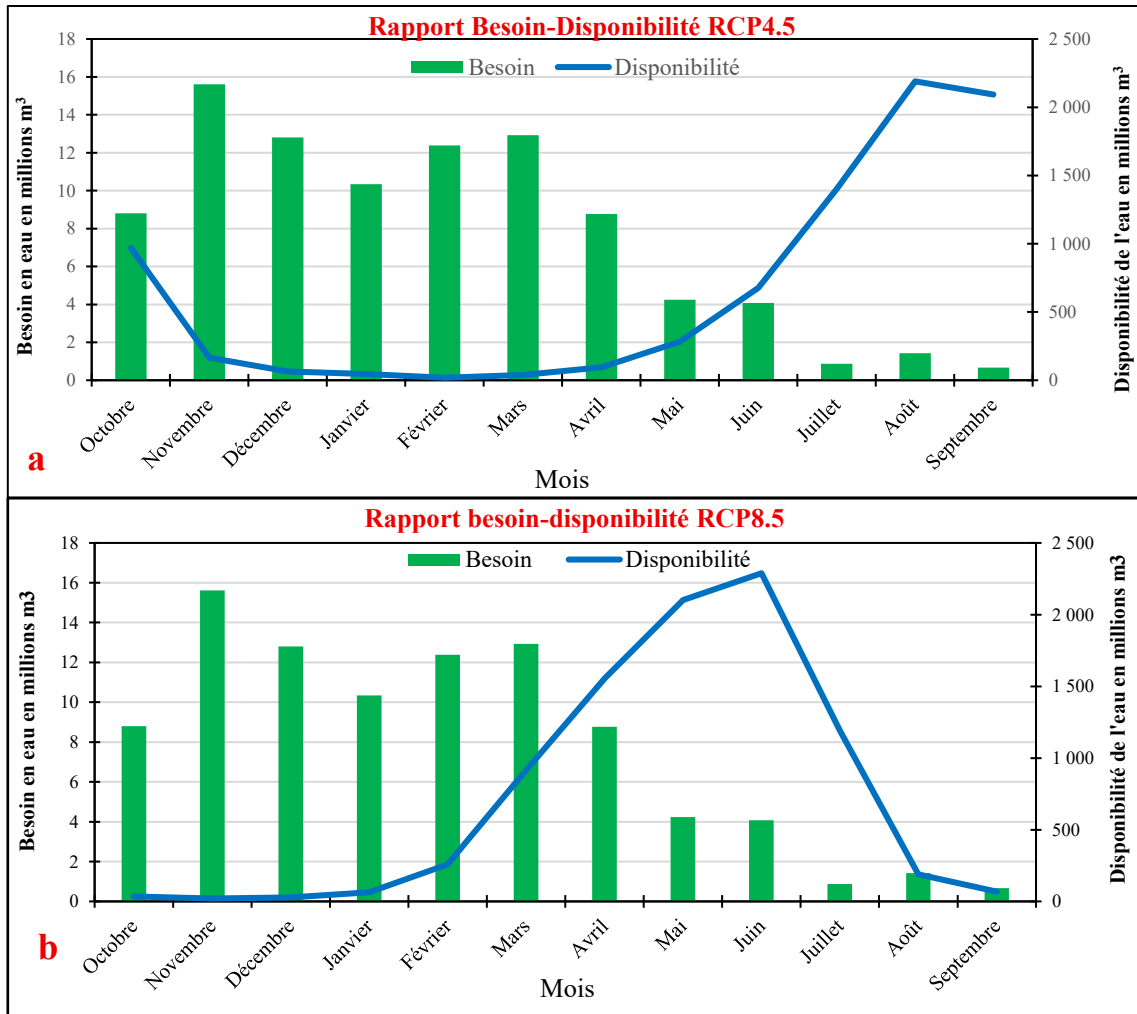


Figure 115: Rapport besoins et disponibilité en eau selon les scénarios RCP4.5 (a) et RCP8.5 (b) du modèle REMO2009

Discussion

Dans la présente étude, les besoins en eau d’irrigation dans le complexe sucrier de Borotou-Koro ont été évalués. Les résultats donnent un aperçu des besoins en eau d’irrigation à court et à moyen terme dans le complexe sucrier. Dans le suivi de l’évolution des besoins en eau d’irrigation, il ressort que sur la période 2012-2020, une légère baisse de la consommation en eau a été observée pendant les campagnes agricoles 2015-2017. Cette baisse faisant suite à une constance des besoins durant les campagnes antérieures (2012 à 2015). Une hausse brutale de l’eau consommée dans l’exploitation s’est faite remarquer sur les trois dernières campagnes agricoles à la suite de la baisse. Cette variabilité de la quantité d’eau consommée principalement dans les exploitations agricoles du complexe sucrier pourrait être due à la variation de l’évapotranspiration qui a un impact sur les besoins hydriques des cultures. Cette observation a été faite par N’Guessan (2024) dans l’évaluation des besoins hydriques du riz dans le département de Yamoussoukro. La baisse de la consommation en eau pendant les deux

campagnes agricoles (2015-2017), pourrait être le fait de l'amélioration de l'efficience du réseau d'irrigation, la prise en compte de certains paramètres comme la pluie dans la détermination des besoins et l'adaptation du calendrier agricole aux réalités climatiques. En effet, une bonne efficience du réseau d'irrigation comme c'est le cas dans le complexe sucrier de Borotou-Koro, permet l'acheminement de l'eau de la station de pompage jusqu'à la distribution aux têtes de parcelle par la réduction des pertes d'adduction. Cela réduit considérablement les volumes d'eau consommés pendant la campagne. Selon Nini & Mebarki (2020), les progrès en matière d'installation d'équipements plus économes en eau permettent d'améliorer l'efficience à la parcelle d'environ 75 % et de réduire les quantités d'eau destinée à l'irrigation. Par ailleurs, l'adaptation du calendrier cultural aux réalités climatiques permet de réduire considérablement les apports d'eau pour combler le déficit hydrique des plantes de canne à sucre. En effet, lorsque le planting des boutures de canne est effectué au premier trimestre de l'année, les différents stades phénologiques coïncident avec les saisons de sorte que la période de la canne exigeante en eau tombe à pic avec la grande saison des pluies. Ce besoin hydrique compensé par les pluies, reste considérable s'il devrait être comblé par irrigation. L'augmentation de la consommation en eau sur les deux dernières campagnes s'explique par la volonté des décideurs d'accroître la production de canne d'où l'augmentation des superficies irriguées. Cette augmentation à engendrer une hausse des volumes d'eau consommée pendant ces campagnes agricoles. Face à l'insuffisance du sucre sur le marché ivoirien et à la menace de l'ouverture du marché du sucre jusque-là uniquement réservé aux sucreries ivoiriennes (Sucrivoire et Sucaf), les agro-industrielles dans le but de produire plus, ont opté pour l'augmentation des parcelles irriguées. Or, cette augmentation des superficies occasionne la hausse des besoins en eau dans le complexe sucrier. La hausse des volumes d'eau consommés de 2018 à 2020, sur le complexe sucrier suggère que la demande en eau d'irrigation pour la canne accroît davantage, ce qui envisage qu'aux horizons futurs (2040, 2060), la demande continuera d'augmenter. Selon le dernier rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), l'essentiel de l'accroissement observé de la température moyenne globale depuis le milieu du 20^{ème} siècle est très probablement dû à l'augmentation observée des concentrations de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique (GIEC, 2014). Toutes les projections futures du climat global prévoient une intensification du réchauffement moyen, en plus de la variabilité des précipitations et aussi une plus grande fréquence et une intensification des phénomènes extrêmes. Les impacts de cette variabilité climatique varient d'une région du globe à une autre avec des conséquences socio-économiques particulièrement importantes dans les pays en développement (Sultan *et al.*, 2015).

En Afrique, une augmentation de la magnitude et de la fréquence des événements extrêmes est anticipée (Chemura *et al.*, 2022). Parmi les zones les plus affectées, figure l'Afrique de l'Ouest (Dilley, 2005 ; GIEC, 2014), où les secteurs clés de développement des pays sahéliens, notamment l'environnement, l'agriculture, les ressources en eau, sont considérés comme particulièrement vulnérables aux changements climatiques qui vont s'accompagner de nouveaux régimes de pluies (Salack *et al.*, 2016). Le faux départ, l'arrêt précoce de la saison des pluies, l'augmentation du nombre de nuits et de journées chaudes et une tendance à la baisse dans la variation des précipitations journalières menacent la sécurité alimentaire (Salack *et al.*, 2016). Les impacts de la variation climatique globale présentent des risques sérieux pour l'agriculture, qu'il soit pluvial ou même irrigué (Mballo *et al.*, 2019). Cette étude a permis de mettre en lumière cette allégation. En effet, les besoins en eau d'irrigation de la canne à sucre déterminés dans cette étude font état d'une demande de plus en plus croissante. La culture de canne à sucre est une culture à fort besoin en eau, résistant moins à la sécheresse. Avec une capacité élevée d'absorption d'eau dans le sol par son système racinaire. La canne à sucre a des besoins en eau croissants, liés à son cycle de développement et à la demande évaporative (Konaté *et al.*, 2025). Elle doit donc être cultivée dans des zones ayant des précipitations comprises entre 1200 et 1600 mm par année. Les besoins en eau d'irrigation varient selon les modèles climatiques sous leurs différents scénarios. Ainsi, pour le modèle RACMO22T, les besoins seront estimés à plus de 42% par rapport aux besoins observés. Le modèle RCA4 prévoit 45% d'augmentation et pour le modèle REMO2009, 35%. Ces augmentations sont à la fois dues à la hausse des températures, mais aussi à l'augmentation des superficies agricoles. Selon Kouamé *et al.* (2009), les compagnies sucrières ont opté pour l'extension des surfaces agricoles pour garantir l'autosuffisance en sucre en Côte d'Ivoire. Les scénarii de changements climatiques montrent une hausse de la température et une tendance à la baisse des précipitations (Bodian, 2014). Dans ce contexte, l'agriculture sera affectée par ces bouleversements climatiques, avec une probabilité de baisse des rendements si les apports d'eau naturels ne sont pas soutenus par les apports artificiels. Mais contrairement au constat fait dans cette étude, les résultats des études de Sun *et al.* (2017) ont montré que malgré la hausse relative des températures et la baisse des précipitations effectives, les besoins en eau d'irrigation des principales cultures ont montré une tendance à la baisse dans les scénarios futurs de changement climatique. Dans les scénarios climatiques futurs, l'augmentation de la température augmentera la capacité d'évapotranspiration des cultures, la diminution des précipitations affectera la demande d'eau d'irrigation des cultures, les deux ayant un effet couplé sur l'offre et la demande de ressources en eau (Guo & Shen, 2016). Ainsi, dans les régions où l'eau est limitée,

l'attribution des modifications d'écoulement au changement climatique et aux facteurs anthropogéniques est un sujet important pour la planification future des ressources en eau et les décisions de gestion afin de garantir une utilisation durable des ressources en eau (Lei *et al.*, 2014). Les données de modèles climatiques couplées avec l'occupation du sol ont rendu disponible la simulation des écoulements. Les prévisions d'écoulements mensuels et annuels selon les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 des trois modèles climatiques pour les périodes 2021-2040 et 2041-2060, ne sont pas unanimes quant à la baisse ou à la hausse des écoulements par rapport à la période 1970-2020, comme l'ont signifié les études de Touré (2023) dans le bassin versant de la Lobo. Le VIème rapport du GIEC prévoit des modifications dans tous les compartiments du cycle hydrologique et durant l'année hydrologique dans son intégralité (Bates *et al.*, 2008). Les situations de sécheresse provoqueront la chute de la production agricole et menaceront les cours d'eau. Milly *et al.* (2005) ont simulé les tendances globales de l'évolution des débits à l'horizon 2060. Ils prévoient une diminution d'environ 10 à 30% dans le sud de l'Europe. Les études de Alcamo *et al.* (2007) prévoient des valeurs de débits à la hausse de +9 à +22% en Europe du Nord d'ici 2070. Au-delà des débits moyens, les impacts comprendront à la fois des débits de pointe plus élevés, ainsi que des étiages plus longs et plus sévères (Arnell, 2003). Toutes ces contestations démontrent le caractère péjoratif de la variabilité climatique sur les activités liées à la survie humaine. En dépit de ces contradictions, fort est de constater que les demandes en eau d'irrigation dans le bassin versant du Sassandra à Sorotona sont inférieures aux débits et ceux sur tous les mois de l'année et aux horizons futurs. Toutefois, le rapport entre les besoins en eau d'irrigation et la disponibilité de l'eau est inférieur à 0,4 dans le bassin versant. Selon l'indice de rareté de l'eau lorsque le rapport entre le besoin et la disponibilité est supérieur 0,4, le bassin versant est considéré comme un bassin soumis au stress hydrique sévère (Falkenmark *et al.*, 2009). Cependant, le Sassandra à Sorotona a des débits bas pendant les mois de décembre à mai, qui n'affectent pas pour le moment la satisfaction des besoins hydriques de la canne à sucre dans les exploitations et les besoins de production de sucre. Cela rapporte que, les débits du fleuve sont beaucoup plus importants que la demande en eau tous les mois de l'année. Il n'aura donc pas de pénurie d'eau dans le bassin versant pour la production de sucre. Contrairement à ce constat, les travaux de Ouédé (2024) dans le bassin versant du Bandama plus précisément dans les complexes sucriers de Ferkéssédougou 1 et 2 au Nord de la Côte d'Ivoire ont montré une pénurie d'eau de janvier à mars. Cette pénurie crée la non satisfaction des besoins hydriques de la canne à sucre. Cela fait dire à Shen *et al.* (2013) que dans certains bassins fluviaux, même si les ressources annuelles en eau peuvent répondre aux besoins d'irrigation, il y a d'énormes déficits pendant certaines périodes critiques de demande d'eau. Ce

type de pénurie saisonnière renforce le stress hydrique dans le cycle d'évolution des cultures. D'autre part, l'extension sans précédent des zones de cultures à irriguer entraîne une augmentation de la demande en eau d'irrigation et cause une dégradation écologique dans les cours d'eau (Shen *et al.*, 2013).

Conclusion partielle

L'analyse des besoins a permis d'apprécier l'évolution des besoins hydriques de la canne à sucre en fonction des périodes de planting ou de repousse, préconisant ainsi le premier trimestre de l'année pour le planting des boutures afin d'optimiser les apports en eau d'irrigation. En effet, les besoins futurs en eau d'irrigation montrent une augmentation généralisée avec la hausse des températures. Le suivi des volumes d'eau consommés par mois dans l'exploitation agricole montre que les pics de consommation sont atteints en janvier dans le secteur agricole B et en zone industrielle et en décembre dans les secteurs agricoles C et D. La fin généralisée de l'irrigation est observée au mois de septembre. D'une campagne agricole à une autre, les volumes d'eau consommés varient, tout en maintenant une évolution à la hausse due à l'augmentation des superficies irriguées. Les estimations futures des besoins en eau d'irrigation de la canne à sucre sont effectuées par modèle climatique et selon que la parcelle soit irriguée ou assistée. Ainsi, selon le suivi mensuel, pour le modèle RCA4, les cannes estimeront leurs pics de besoins au mois d'octobre. Les plus faibles besoins sont estimés au mois de juillet. Le modèle REMO2009, par contre prévoit les pics de besoins au mois de novembre. Les baisses de besoins sont constatées à partir du mois de mars jusqu'en septembre. Enfin, le modèle RACMO22T renseigne que les pics de besoins sont estimés au mois d'août. Par ailleurs, la quantification des écoulements sur la période de 1970 à 2020 à l'exutoire du bassin versant estime que plus d'un milliard de mètre cube d'eau s'écoule en moyenne par année. Les débits de pointe sont atteints au mois de septembre, alors que les débits les plus faibles sont au mois de mars. La disponibilité en eau dans le bassin versant selon le modèle RACMO22T montre que les mois de janvier à mars présenteront les plus faibles débits d'écoulement mensuel. Pour les autres mois de l'année, les écoulements seront supérieurs à 100 millions de mètres cubes, atteignant les pics d'écoulement au mois d'août. Selon le modèle RCA4, les écoulements les plus faibles sont estimés de novembre à mars. Les débits de pointe sont observés au mois d'août. Les débits générés par le modèle REMO2009 expriment une abondance de la ressource en eau dans le bassin versant. Les débits de pointe sont enregistrés aux mois de novembre à septembre. Par contre, les faibles débits sont circonscrits entre janvier et mars.

Le rapport disponibilité-besoin en eau dans le complexe sucrier de Borotou-Koro a été suivie selon les différents scénarios (RCP4.5 et RCP8.5) des modèles climatiques RACMO22T, RCA4 et REMO2009. Le suivi mensuel fait remarquer que les besoins en eau d'irrigation et de production de sucre sur la période 2005-2020 sont largement satisfaits, même en période de basse eau. Par la suite, il ressort que pour tous les modèles climatiques mis à contribution dans cette étude, les demandes futures en eau d'irrigation et de production de sucre pourraient être satisfaites malgré la hausse croissante des besoins en eau d'irrigation.

CONCLUSION

Ce travail avait pour objectif de quantifier les ressources en eau de surface pour satisfaire les besoins à court et moyen terme dans l'exploitation agricole de Borotou Koro afin de garantir la production de la canne à sucre. Pour y parvenir, trois (3) objectifs spécifiques ont été fixés. Le premier a consisté à caractériser les paramètres agroclimatiques garants d'une bonne production agricole. Le deuxième a consisté à évaluer la disponibilité de l'eau dans le bassin versant. Enfin le troisième, a consisté à établir le rapport entre la demande et la disponibilité en eau dans l'exploitation agricole de Borotou Koro. Concernant le premier objectif spécifique, les paramètres agroclimatiques tels que les dates de début des saisons de pluies (DSP), les dates de fin de saison des pluies (FSP), les longueurs des saisons de pluie (LSP), les hauteurs de pluies saisonnières (HMP), les cumuls de pluie saisonniers (CSP), le nombre de jour de pluie (NJP) et les séquences sèches (SS) ont été déterminés. Ces paramètres agroclimatiques ont permis de connaître la variation des saisons de pluie dans le bassin versant. Les résultats ont montré que les DSP accusent de plus en plus du retard et les FSP arrivent de façon précoce. On assiste donc à un raccourcissement des LSP. Les CPS sont de plus en plus à la baisse avec des SS plus longues. Les projections climatiques réalisées par les modèles RACMO22T, RCA4 et REMO2009, sous les scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5 ont montré une hausse générale de la température moyenne annuelle dans le bassin versant aux horizons 2040 et 2060. Cependant, au niveau des précipitations, tous les modèles climatiques ne sont pas unanimes sur une baisse ou une hausse de la pluviométrie dans le bassin versant. L'évaluation des ressources en eau face aux changements climatiques et aux changements d'occupation du sol a été simulée par le modèle hydrologique CEQUEAU après calibration et validation. Tout d'abord, à travers le traitement des images Landsat TM, ETM+ et OLI 8, des changements temporels et spatiaux de l'occupation du sol sur les périodes 1986-2003 et 2003-2020 ont permis d'analyser la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant. Les résultats ont montré une expansion des surfaces de cultures, des habitats et des sols nus dans le bassin versant, tandis que les zones forestières et savanicoles sont en forte régression. Cette dynamique est la conséquence de l'augmentation de la pression anthropique. La modélisation prospective a été utilisée pour simuler la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant à l'aide du modèle LCM aux horizons 2040 et 2060. Les résultats obtenus sur la phase de calage des sous-modèles de transition ont permis de valider la carte prédictive par rapport à la carte de référence de 2020. Les résultats obtenus des cartes simulées à l'horizon 2034 et 2054 montrent que les zones d'habitats, de sols nus et les cultures continueront à augmenter. Les zones forestières et savanicoles diminueront tandis que les plans d'eau et les zones humides seront relativement stables. Ensuite, l'évaluation des ressources en eau face aux changements climatiques et aux

changements d'occupation du sol a été simulée par le modèle hydrologique CEQUEAU après calibration et validation. La prise en compte de l'impact du changement climatique et de la dynamique de l'occupation du sol a montré qu'une diminution des surfaces végétales naturelles augmente les apports d'eau dans le bassin versant, ce qui n'est pas toujours le cas durant les périodes d'étiage. Le suivi de l'évolution des besoins historiques et futurs dans le complexe sucrier montre une hausse liée aux changements climatiques. Tous les modèles climatiques étudiés sont unanimes sur la hausse des températures dans le bassin versant qui engendre nécessairement une hausse des besoins hydriques dans les exploitations agricoles. Par ailleurs, l'étude des débits actuels et futurs présente des écoulements permanents dans le bassin versant quel que soit le mois de l'année. L'analyse des besoins et de la disponibilité des ressources en eau a montré que, sur la base des débits moyens mensuels, les besoins en eau pour la production de sucre envisagés, sont satisfaits quel que soit le mois de l'année hydrologique aux l'horizon 2040 et 2060.

Recommandations

A l'issue de cette étude, des recommandations vont à l'endroit de la société agro-alimentaire Sucrivoire. Il s'agit entre autres de :

- installer des stations hydrométriques en amont de l'exploitation agricole pour quantifier les débits entrants ;
- utiliser les tensiomètres agricoles pour le pilotage de l'irrigation ;
- planifier le planting des boutures de canne à sucre, en tenant compte du calendrier agricole proposé dans cette étude ;
- construire des seuils sur le profil du cours d'eau, en aval de chaque station de pompage.

A l'endroit des autorités compétentes cette étude recommande aussi de :

- renforcer le réseau d'observation des paramètres hydroclimatiques au sein du bassin versant, en particulier dans la zone frontalière, essentiel pour acquérir les données nécessaires à la réalisation d'études antérieures ;
- collaborer avec les services hydrologiques de Guinée afin d'assurer un suivi rigoureux des ressources en eau, étant donné que le phénomène de l'orpaillage illégal devient de plus en plus fréquent dans la région.

Perspectives

Cette étude a permis de caractériser les paramètres agroclimatiques dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona, d'évaluer les écoulements et d'établir le rapport entre les besoins et la disponibilité de l'eau, afin de pérenniser la production de sucre dans le complexe sucrier de Borotou Koro. L'étude n'ayant pas été exhaustive, elle ouvre la voie à plusieurs perspectives en vue d'approfondir les recherches quant à la mobilisation des ressources en eau de surface. Il s'agit :

- d'effectuer des études de caractérisation physico-chimique des eaux du bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona ;
- d'évaluer les ressources en eau souterraine pouvant être mobilisées dans le bassin versant ;
- étudier les extrêmes climatiques ayant un impact sur la culture de canne à sucre dans le bassin versant.

RÉFÉRENCES

- Adejuwon J.O., Balogun E.E. & Adejuwon S.A. (1990). On the annual and seasonal patterns of rainfall fluctuations in sub-saharan West Africa. *International Journal of Climatology*, 10(8): 839-848.
- Adiaffi B., Wango T.E., Gnamba F.M., Kpan O.J.G. & Baka D. (2016). Analyse de la relation pluie-débit dans un contexte de variabilité climatique dans la région de Katiola. *International Journal of Engineering Science Invention*, 5(12) : 38-45.
- Agbanou B.T. (2018). Dynamique de l'occupation du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé (Nord-Ouest Bénin) : de l'analyse diachronique à une modélisation prospective. Thèse de Doctorat en Géographie et aménagement, Université Toulouse le Mirail, France, 271 p.
- Aka A.A., Servat E., Paturel J.E., Kouamé B., Lubes H. & Masson J.M. (1996). Analysis of the temporal variability of runoff in Ivory Coast: statistical approach and phenomena characterization. *Hydrological Sciences Journal*, 41(6): 959-970.
- Albergel J. & Valentin C. (1991). Sahélisation d'un petit bassin versant soudanien Kognere-Boulsa, au Burkina Faso. *Presse Universitaire de Dakar*, 1990 : 119-133.
- Alcamo J., Flörke M. & Märker M. (2007). Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrological Sciences Journal*, 52(2): 247-275.
- Alexander L.V., Zhang X., Peterson T.C., Caesar J., Gleason B., Klein Tank A.M.G., Haylock M., Collins D., Trewin B., Rahimzadeh F., Tagipour A., Rupa Kumar K., Revadekar J., Griffiths G., Vincent L., Stephenson D.B., Burn J., Aguilar E., Brunet M., Taylor M., et al. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(5): 1-22.
- Alhassane A., Salack S., Ly M., Lona I., Traoré S.B. & Sarr B. (2013). Évolution des risques agroclimatiques associés aux tendances récentes du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. *Sécheresse*, 24(4) : 282-293.
- Allen M.R. & Ingram W.J. (2002). Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*, 419(6): 224-232.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. & Smith M. (1998). FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome, 300 p.
- Amoussou E., Tramblay Y., Totin H.S.V., Mahé G. & Camberlin P. (2014). Dynamique et modélisation des crues dans le bassin du Mono à Nangbéto (Togo/Bénin). *Hydrological Sciences Journal*, 59(11): 2060-2071.
- Ardoin-Bardin S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat en Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc, France, 441 p.
- Arnell N.W. (2003). Effects of IPCC SRES emissions scenarios on river runoff: a global perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(5) : 619-641.

- Aubertin C. (1983). Histoire et création d'une région "sous - développée". Les cahiers de l'ORTOM, série science humaine. Errata, 9, 182 p.
- Awotide B.A., Abdoulaye T., Alene A. & Manyong V.M. (2015). Impact of access to credit on agricultural productivity: Evidence from smallholder cassava farmers in Nigeria. *Conférence de l'Association internationale des économistes agricoles (IAAE)*, du 9 au 14 août 2015, Milan, Italie, pp 1-33.
- Balme M. (2004). Analyse du régime pluviométrique sahélien dans une perspective hydrologique et agronomique. Etude de l'impact de sa variabilité sur la culture du mil. Thèse de Doctorat en Océan, atmosphère, hydrologie. Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble (France), 162 p.
- Balme M., Galle S. & Lebel T. (2005). Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger. *Sécheresse*, 16(1), 15-22.
- Barima Y.S.S., Barbier N., Bamba I., Traoré D., Lejoly J. & Bogaert J. (2009). Dynamique paysagère en milieu de transition forêt-savane ivoirienne. *Bois & Forêts des tropiques*, 299 : 15-25.
- Bates B.C., Kundzewicz Z.W., Wu S. & Palutikof J.P. (2008). Le changement climatique et l'eau. Document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève, 237 p.
- Ben Mohamed A., Van Duivenbooden N. & Abdoussallam S. (2002). Impact of Climate Change on Agricultural Production in the Sahel – Part 1. Methodological Approach and Case Study for Millet in Niger. *Climatic Change*, 54(3) : 327-348.
- Blaney H.F. & Criddle, W.D. (1962). Determining consumptive use and irrigation water requirements. United States Department of Agriculture Agricultural Research Service Tech Bull 1275, 59 p.
- Blé L. O., Koffi F. K., Degny G. S., & Soro T. D. (2021). Variabilité climatique et ressources en eaux de la région des grands ponts (Sud de la Côte d'Ivoire). *Revue des Sciences et de la Technologie*, 27(1), 49-60.
- Bigot S. (1997). Les précipitations et la convection profonde en Afrique centrale : cycle saisonnier, variabilité interannuelle et impact sur la végétation. Thèse de Doctorat en Géographie et climatologie, Université de Bourgogne, Dijon (France), 282 p.
- Bigot S., Moron V., Melice J.L., Servat E. & Paturel J.E. (1998). Fluctuations pluviométriques et analyse fréquentielle de la pluviosité en Afrique centrale. *International Association Hydrological Sciences*, 252 : 71-78.
- Bigot C. (2005). Image et dignité : état des lieux. Paris (2), *LEGICOM*, 34(2) : 5-12.
- Bodian A. (2014). Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Physio-Géo*, 5(8) : 297-312.

- Bodian A., Ndiaye O. & Dacosta H. (2016). Evolution des caractéristiques des pluies journalières dans le bassin versant du fleuve Sénégal : Avant et après rupture. *Hydrological Sciences Journal*, 61(5): 905-913.
- Bourgin P.-Y. (2019). Modèle intégré du fonctionnement hydrologique du bassin versant du Sassandra. *La Houille Blanche*, 5 (6) : 124-139.
- Boussougou G.B. (2017). Vulnérabilité des paysages forestiers en relation avec les activités humaines et la variabilité climatique en Tanzanie : analyse prospective des dynamiques de l'occupation du sol des réserves forestières de Pugu et de Kazimzumbwi. Thèse de Doctorat en Géographie, Université de la Réunion (France), 212 p.
- Briche E., Madelin M., Beltrando G. & Kergomard C. (2010). Analyse comparative des températures extrêmes de 1950 à 2100 issues des modèles ARPEGE-Climat et LMD : intérêt pour l'activité viticole champenoise. *Climatologie*, 7 : 9-19.
- Bricquet J.P., Mahé G., Bamba F. & Olivry J.-C. (1996). Changements climatiques récents et modification du régime hydrologique du fleuve Niger Koulikoro (Mali). *International Association Hydrological Sciences*, 238 : 157-166.
- Bricquet J. P., Bamba F., Mahé G., Touré M. & Olivry J.-C. (1997). Evolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique. *Revue des Sciences de l'Eau*, 10(3) : 321-337.
- Brou Y.T. (2005). Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire de synthèse des activités scientifiques présenté en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Techniques de Lille, France, 212 p.
- Camara Y., Keïta O., Camara A. B., Traoré M. & Ouédraogo D. (2021). Étude du régime hydrologique à partir des pluies du fleuve Tinkisso à Dabola en République de Guinée. *Revue. Ivoirien des Sciences Technologiques*, 38 : 471-484.
- Camil J. (1972). Note préliminaire sur les charnockites et gneiss de Man (Côte d'Ivoire). Bulletin. *Société géologique de France*, 7 (5) : 191-195.
- Carvalho A.L., Menezes R.S.C., Nóbrega R.S., Pinto A. de S., Ometto J.P.H.B., Von Randow C. & Giarolla A. (2015). Impact of climate changes on potential sugarcane yield in Pernambuco, northeastern region of Brazil. *Renewable Energy*, 78: 26-34.
- Chemura A., Nangombe S.S., Gleixner S., Chinyoka S. & Gornott C. (2022). Changes in climate extremes and their effect on maize (*Zea mays* L.) suitability over Southern Africa. *Frontiers in Climate*, 4 : 1-14.
- Collomb P. (1999). Une voie étroite pour la sécurité alimentaire d'ici à 2050, Economica, Paris (France), 341 p.
- Coulibaly K.A. (2021). Impacts de la Variabilité Récente de la Pluviométrie sur les Paramètres Agroclimatiques Majeurs et les Calendriers Agricoles pour une Corrélation avec le Système Couplé Océan-Atmosphère en Côte D'Ivoire. Thèse de Doctorat en Géographie, Université Félix Houphouët-Boigny Abidjan, Cote d'Ivoire, 360 p.

- Coulibaly N., Coulibaly T.J.H., Mpakama Z. & Savané I. (2018). The impact of climate change on water resource availability in a trans-boundary basin in West Africa: The case of Sassandra. *Hydrology*, 5(1): 1-12.
- Crow W.T. & Van Loon E. (2006). Impact of incorrect model error assumptions on the sequential assimilation of remotely sensed surface soil moisture. *Journal of Hydrometeorology*, 7(3): 421-432.
- Daugrois J.H., Champoiseau P & P. Rott. (2007). Analyse de risques et impact sur la gestion des maladies, le cas de l'échaudure des feuilles de la canne à sucre en Guadeloupe.
- Dékoula S.C., Kouamé B., N'Goran K.E., Ehounou J.N., Yao G.F., Kassin K.E., Kouakou B.J., N'Guessan B.E.A. & Nagnin S. (2018). Variability of rainfall descriptors with agricultural impact in the cotton basin of Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 130: 199-212.
- Demaree G.R. & Nicolis C. (1990). Onset of sahelian drought viewed as a fluctuation-induced transition. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 116(491): 221-238.
- Descroix L. (2018). Processus et enjeux d'eau en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. Archives contemporaines, AEC, Paris, 320 p.
- Dhonneur G. (1985). Traité de météorologie tropicale : application au cas particulier de l'Afrique occidentale et centrale. Direction de la Météorologie, France, 151 p.
- Diallo I., Giorgi F., Deme A., Tall M., Mariotti L. & Gaye A.T. (2016). Projected changes of summer monsoon extremes and hydroclimatic regimes over West Africa for the twenty-first century. *Climate Dynamics*, 47(12): 3931-3954.
- Dibi Kangah P.A. (2010). Rainfall and agriculture in Central West Africa since 1930: impact on socioeconomic development. Academic Publishing, Saarbrücken, 304 p.
- Dieng O., Roucou P. & Louvet S. (2008). Variabilité intra-saisonnière des précipitations au Sénégal (1951-1996). *Sécheresse*, 19(2): 87-93.
- Dilley M. (2005). Natural disaster hotspots: a global risk analysis. World Bank Publications (Washington), 132 p.
- Dingkuhn M., Sow A., Samb A., Diack S. & Asch F. (1995). Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel-I. Photothermal and micro-climatic responses of flowering. *Agricultural Systems*, 48(4): 385-410.
- Diomandé B.I., Konan K.P.M. & Yao N. B. S. (2016). Variabilité pluviométrique et riziculture dans la sous-préfecture de Béoumi au centre-nord de la Côte d'Ivoire. *Revue de Géographie Tropicale et Environnement*, (2) :7-17.
- Douared Myriam. (2004). Sélection variétale de la canne à sucre : approche statistique. Programme européen DOCUP 2000-2006. Contrat d'entreprise du Cirad-Ca - 2ème tranche - Année 2004. Programme de travaux d'appui au développement de la canne à sucre en Guadeloupe. Montpellier : CIRAD, 37 p.

- Dunglas J. (1993). Effet de serre et activités humaines (gaz à effet de serre d'origine anthropique). *Sécheresse*, 4(4): 211-220.
- Eastman J.R. (2012). Idrisi selva tutorial. Idrisi Production, Clark Labs-Clark University, 45: 51-63.
- Falkenmark M., Rockström J. & Karlberg L. (2009). Present and future water requirements for feeding humanity. *Food Security*, 1(1): 59-69.
- F.A.O. (2003). World agriculture: towards 2015/2030. An FAO perspective. Ed. Jelle Bruinsma. FAO-Earthscan Publications Ltd. Londres (Reino Unido). 432 pp
- Farinosi F., Arias M.E., Lee E., Longo M., Pereira F.F., Livino A., Moorcroft P.R. & Briscoe J. (2019). Future Climate and Land Use Change Impacts on River Flows in the Tapajós Basin in the Brazilian Amazon. *Earth's Future*, 7(8): 993-1017.
- Fontaine B. (1990). La dynamique de mousson pluvieuse en Afrique de l'Ouest in Climatologie tropicale. *Cahiers du Centre de Recherches de Climatologie*, 13: 33-62.
- Fontaine B., Janicot S., Moron V., Roucou P. & Trzaska S. (1998). Anomalies de température de surface de la mer et précipitations tropicales-Synthèse de quelques travaux récents portant sur les précipitations au sahel et dans le nordeste. *La Météorologie*, 1998(23): 14-35.
- Fossou R.M.N., Soro N., Traoré V.B., Lasm T., Sambou S., Soro T., Orou R.K., Cisse M.T. & Kane A. (2014). Variabilité climatique et son incidence sur les ressources en eaux de surface : cas des stations de Bocanda et de Dimbokro, Centre-Est de la Côte d'Ivoire en Afrique de l'Ouest. *Internationale des Sciences et Technologie*, 10(4) : 118-134.
- Franquin P. (1973). Analyse agroclimatique en régions tropicales. Méthode des intersections et période fréquentielle de végétation. *Agronomie tropicale*, 28 : 665-682.
- Garcia F., Folton N. & Oudin L. (2017). Which objective function to calibrate rainfall-runoff models for low-flow index simulations? *Hydrological Sciences Journal*, 62(7): 1149-1166.
- Gauze T.K.M., Morton K.Y., Hermann M.N., Largaton S.G. & Emile S.G. (2018). Impacts des changements de l'occupation du sol et des changements climatiques sur le bassin versant de la rivière Davo, Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal*, 14 (33): 408-428.
- Gemenne F., Barnett J., Adger W.N. & Dabelko G.D. (2014). Climate and security: evidence, emerging risks, and a new agenda. *Climatic Change*, 123(1): 1-9.
- GIEC (2007) : Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. Publié sous la direction de GIEC, Genève, Suisse, 103 p.
- GIEC (2014). Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat. Climate change 2014: Impact, adaptation and vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects.

- Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 150 p.
- Girard M.C. (1999). Traitement des données et télédétection. Paris, France, 529 p.
- Gnopo K S. (2010). Module : Botanique, Physiologie et Agrométéorologie. Agronomie de la canne à sucre. RTC, Robert Antoine Building, Mauritius :1-53
- Goebel F.-R. & Sallam N. (2011). New pest threats for sugarcane in the new bioeconomy and how to manage them. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(1–2): 81–89.
- Gomathi R., Gururaja Rao P.N., Chandran K. & Selvi A. (2015). Adaptive Responses of Sugarcane to Waterlogging Stress: An Over View. *Sugar Tech*, 17(4): 325–338.
- Götzinger J. & Bárdossy A. (2008). Generic error model for calibration and uncertainty estimation of hydrological models. *Water Resources Research*, 44(12):1-18.
- Goula B.T.A., Savané I., Konan B., Fadika V. & Kouadio G.B. (2006). Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N’Zo et N’Zi en Côte d’Ivoire (Afrique tropicale humide). *VertigO-la revue électronique en sciences de l’environnement*, 7(1): 1-22.
- Goula B.T.A., Kouadio Z.A., Kouakou K.E., N’go Y.A., N’doume C. & Savane I. (2009). Simulation du comportement hydrologique du bassin versant de l’Agneby, en Côte d’Ivoire. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 13: 91-119.
- Goula B.T.A., Srohourou B., Brida A., N’zué K.A. & Goroza G. (2010). Determination and variability of growing seasons in Côte d’Ivoire. *International Journal Engineering Sciences*, 2(11): 5993-6003.
- Groisman P.Y., Knight R.W., Easterling D.R., Karl T.R., Hegerl G.C. & Razuvaev V.N. (2005). Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of climate*, 18(9): 1326-1350.
- Guo Y. & Shen Y. (2016). Agricultural water supply/demand changes under projected future climate change in the arid region of northwestern China. *Journal of Hydrology*, 540: 257-273.
- Hagblade S., Hazell P.B., Kirsten I. & Mkandawire R. (2004). African agriculture: past performance, future imperatives. Washington, DC: International Food Policy Research Institute (IFPRI), 12(1): 1-18.
- Hamon P., Glaszmann J.-C., Perrier X. & Seguin M. (1999). Diversité génétique des plantes tropicales cultivées. Éditions Quae : 1–388.
- Hamza H. & Oumar N. (2021). Sucrivoire, carte d'identité. West africa rating agency, 13 p.
- Han H., Yang C. & Song J. (2015). Scenario simulation and the prediction of land use and land cover change in Beijing, China. *Sustainability*, 7(4): 4260-4279.

- Hansen J., Sato M., Ruedy R., Lo K., Lea D.W. & Medina-Elizade M. (2006). Global temperature change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(39): 14288-14293.
- Hasan S., Shi W., Zhu X., Abbas S. & Khan H.U.A. (2020). Future simulation of land use changes in rapidly urbanizing South China based on land change modeler and remote sensing data. *Sustainability*, 12(11): 1-24.
- Hortness J.E. (2006). Estimating low-flow frequency statistics for unregulated streams in Idaho. US Department of the Interior, US Geological Survey Washington, DC, USA, 201 p.
- Hubert P. & Carbonnel J.-P. (1987). Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 95(1-2): 165-183.
- Hubert P., Carbonnel J.P. & Chaouche A. (1989). Segmentation des séries hydrométéorologiques-application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 110(4): 349-367.
- Hulme M. & Kelly M. (1993). Exploring the links between desertification and climate change. *Environment : Science and Policy for Sustainable Development*, 35(6): 4-45.
- Ibrahim B. (2012). Caractérisation des saisons de pluies au Burkina Faso dans un contexte de changement climatique et évaluation des impacts hydrologiques sur le bassin du Nakanbé. Thèse de Doctorat en Hydrologie, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI (France), 246 p.
- Ingram K.T., Roncoli M.C. & Kirshen P.H. (2002). Opportunities and constraints for farmers of West Africa to use seasonal precipitation forecasts with Burkina Faso as a case study. *Agricultural systems*, 74(3): 331-349.
- INS (2021). Recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) de 2014. Institut National de la statistique (INS). Abidjan, Côte d'Ivoire, 50p.
- Janicot S. & Fontaine B. (1993). L'évolution des idées sur la variabilité interannuelle récente des précipitations en Afrique de l'Ouest. *La météorologie*, 1993(1): 28-53.
- Janicot S., Thorncroft C. D., Ali A., Asencio N., Berry G., Bock O. & Ulanovsky, A. (2008). Vue d'ensemble à grande échelle de la mousson d'été sur l'Afrique de l'Ouest lors de l'expérience de terrain AMMA en 2006. *Annales Geophysicae*, 26 (9) : 2569-2595.
- Jensen J.R. (1983). Biophysical Remote Sensing. *Annals of the Association of American Geographers*, 73(1): 111-132.
- Jones M.R., Singels A. & Ruane A.C. (2015). Simulated impacts of climate change on water use and yield of irrigated sugarcane in South Africa. *Agricultural Systems*, 139: 260–270.
- Joorabian Shoostari S., Shayesteh K., Gholamalifard M., Azari M., Serrano-Notivoli R. & López-Moreno J.I. (2017). Impacts of future land cover and climate change on the water balance in northern Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 62(16): 2655-2673.

- Kendall S.B. (1975). Enhancement of conditioned reinforcement by uncertainty. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 24(3): 311-314.
- Kiprotich P., Wei X., Zhang Z., Ngigi T., Qiu F. & Wang L. (2021). Assessing the impact of land use and climate change on surface runoff response using gridded observations and swat+. *Hydrology*, 8(1) : 37-48.
- Kodja D.J. (2018). Indicateurs des évènements hydroclimatiques extrêmes dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou en Afrique de l'Ouest. Thèse de Doctorat en Sciences de la terre et de l'eau, Université Montpellier, France, 288 p.
- Koffi B. (2022). Modélisation du fonctionnement hydro sédimentaire de la rivière Lobo dans la zone de captage pour l'approvisionnement en eau potable de la ville de Daloa, Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat en Géosciences et environnement, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire, 252 p.
- Koffi B., Kouadio Z.A., Kouassi K.H., Yao A.B., Sanchez M. & Kouassi K.L. (2020). Impact of meteorological drought on streamflows in the Lobo River catchment at Nibéhibé, Côte d'Ivoire. *Journal of Water Resource and Protection*, 12(06) : 495-511.
- Konan B. (2002). Modélisation hydrologique et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant du Sassandra (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat en Hydrologie, Université d'Abobo-Adjamé Abidjan, Côte d'Ivoire, 182 p.
- Konaté Y. (2019). Impact de la dynamique de l'occupation du sol sur la réponse hydrologique de la rivière Lobo à Nibéhibé (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). Mémoire de Master en Génie de l'Eau et de l'Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa (Côte d'Ivoire), 64 p.
- Konaté Y., Kouadio Z. A., Coffi. E. E. & Coulibaly W. B. (2025). Influence des paramètres agroclimatiques sur la production de canne à sucre : cas de l'unité agricole intégrée de Borotou-Koro, Nord-Ouest Côte d'Ivoire. *International Journal for Multidisciplinary Research*, 7 (2) : 6-20.
- Koné B., Dao A., Fadika V., Dabissi N. D. & Kamagaté, B. (2019). Effet de la variabilité pluviométrique sur les écoulements de surface dans le bassin versant de l'Agnéby au Sud-Est de la Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal*, 15(27): 383-401.
- Kouadio Z.A. (2011). Dynamique de l'occupation du sol et comportement hydrologique. Cas des bassins versants côtiers de l'Agnéby et du Boubo. Thèse de Doctorat en Géosciences et environnement, Université d'Abobo-Adjamé Abidjan, (Côte d'Ivoire), 198 p.
- Kouakou K.E., Kouadio Z.A., Kouassi F.W., Bi T.G. & Savane I. (2014). Modélisation de la température et de la pluviométrie dans un contexte de changement climatique : cas de l'Afrique de l'Ouest. *Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 10(1):145-160.
- Kouakou K.E., Kouassi A.M. Kouadio Z.A., Zoura B.J., Goula B.T.A. & Savane I. (2017). Caractérisation des saisons des pluies dans un contexte de changement climatique : Cas du bassin versant de Sassandra (Côte d'Ivoire). *Environmental and Water Sciences, Public Health & Territorial Intelligence*, 1 (1): 1-10

- Kouamé D., Péné C., Zouzou M., Koulibaly S., Tuo K. & Akpa E. (2009). Evaluation agronomique de variétés de canne à sucre en début de campagne de récolte à Ferké au Nord de la Côte d'Ivoire : vers un allègement du schéma de sélection. *Agronomie Africaine*, 21(3) : 319-330.
- Kouamé Y.M. (2017). Impacts des changements climatiques et de la dynamique d'occupation du sol sur les eaux de surface dans le bassin versant de la Davo, Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat en Géosciences et environnement, Université Nangui Abrogoua, Abidjan (Côte d'Ivoire), 229 p.
- Krige D.G. (1951). A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 52(6): 119-139.
- Lambert S.J. & Fyfe J.C. (2006). Changes in winter cyclone frequencies and strengths simulated in enhanced greenhouse warming experiments: results from the models participating in the IPCC diagnostic exercise. *Climate Dynamics*, 26(7-8) : 713-728.
- Lang Delus C. (2011). Les étiages : définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires. *CybergeO*, 517 : 1-22.
- Laraque A., Bricquet J.P., Olivry J.C. & Berthelot M. (1995). Transports solides et dissous du fleuve Congo (bilan de six années d'observations). *Grands Bassins Fluviaux Périatlantique s: Congo, Niger, Amazone* : 133-145.
- Laraque A., Mahé G., Orange D. & Marieu B. (2001). Spatiotemporal variations in hydrological regimes within Central Africa during the XXth century. *Journal of Hydrology*, 245(4): 104-117.
- Lebel T. & Ali A. (2009). Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *Journal of Hydrology*, 375(2): 52-64.
- Leduc C., Favreau G. & Schroeter P. (2001). Long-term rise in a Sahelian water-table: The Continental Terminal in south-west Niger. *Journal of hydrology*, 243(2): 43-54.
- Lei Y., Yang K., Wang B., Sheng Y., Bird, B. W., Zhang G. & Tian L. (2014). Réponse de la dynamique des lacs intérieurs sur le plateau tibétain au changement climatique. *Changement climatique*, 125(2): 281-290.
- Lenderink G., Van Ulden A., Van Den Hurk B. & Keller F. (2007). A study on combining global and regional climate model results for generating climate scenarios of temperature and precipitation for the Netherlands. *Climate Dynamics*, 29 (3) : 157-176.
- Leroux M. (1981). Le climat de l'Afrique tropicale. Bulletin de liaison de l'Association Sénégalaise pour l'Etude du Quaternaire Africain Dakar, (63) : 33-42.
- L'Hôte Y. & Mahé G. (1996). Afrique de l'Ouest et Centrale précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989): West and Central Africa mean annual rainfall (1951-1989). Orstom Paris, 1 p.

- L'Hôte Y., Mahé G., Somé B. & Triboulet J.P. (2002). Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. *Hydrological Sciences Journal*, 47(4) : 563-572.
- Li X. & Yeh A.G.-O. (2002). Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 16(4): 323-343.
- Lienou G., Sighomnou D. & Sigha Nkamdjou L. (1999). Impact de la sécheresse sur les ressources en eau de la cuvette du lac Tchad en période d'étiage: Exemple des apports du fleuve Logone. *Collection GEOCAM*, (2): 89-97.
- Linnenluecke M.K., Nucifora N. & Thompson N. (2018). Implications of climate change for the sugarcane industry. *WIREs Climate Change*, 9(1) : 498.
- Lubés-Niel H., Aka A., Masson J.M., Servat E., Paturel J.E. & Kouamé B. (1995). Essai de mise en évidence d'une variation climatique par application de test statistiques à des séries chronologiques de débit. Application aux grands fleuves de Côte d'Ivoire. *Hydrological Sciences*, 6 (1) : 95-102.
- Mabonzo M. N. (2021). Analyse comparative de régimes des écoulements de surface dans les hydrosystèmes de l'Alima et de la Loufoulakari en République du Congo. *Études caribéennes*, (49): 1-16.
- Maestriperi N. & Paegelow M. (2013). Validation spatiale de deux modèles de simulation : l'exemple des plantations industrielles au Chili. *Cybergéo*, 653 : 1-28.
- Mahé G. (1993). Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique : étude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. Thèse de doctorat en Sciences de la terre, Université de Paris 11 (France), 439 p.
- Mahé G. & Citeau J. (1993). Relations océan-atmosphère-continent dans l'espace africain de la mousson Atlantique : schéma général et cas particulier de 1984. Interactions between the ocean atmosphere and continent in Africa, related to the Atlantic monsoon flow general pattern and the 1984 case study. *Veille Climatique Satellitaire*, (44) : 34-54.
- Mahé G. & Olivry J.-C. (1995). Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, 6(1) : 109-117.
- Mahé G. & Olivry J.-C. (1999). Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa (1951–1989). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 328(9): 621-626.
- Mahé G., Olivry J.-C., Dessouassi R., Orange D., Bamba F. & Servat E. (2000). Relations eaux de surface–eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 330(10): 689-692.
- Mahé G., L'Hôte Y., Olivry J.C. & Wotling G. (2001). Trends and discontinuities in regional rainfall of West and Central Africa: 1951–1989. *Hydrological Sciences Journal*, 46(2): 211-226.

- Mahé G., Dray A., Paturel J.-E., Cres A., Koné F., Manga M., Crès F.N., Djoukam J., Maiga A. & Ouedraogo M. (2002). Climatic and anthropogenic impacts on the flow regime of the Nakambe River in Burkina Faso. *International Association of Hydrological Sciences*, (274): 69-76.
- Mahé G., Olivry J.C. & Servat E. (2005). Sensibilité des cours d'eau ouest-africains aux changements climatiques et environnementaux : extrêmes et paradoxes. *IAHS Publication*, (296): 169-177.
- Mahé G. & Paturel J.-E. (2009). 1896–2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers. *Comptes Rendus Geoscience*, 341(7): 538-546.
- Mahé G., Diello P., Paturel J.-E., Barbier B., Karambiri H., Dezetter A., Dieulin C. & Rouché N. (2010). Baisse des pluies et augmentation des écoulements au Sahel : impact climatique et anthropique sur les écoulements du Nakambé au Burkina Faso. *Sécheresse*, 21(4): 330-332.
- Mahé G., Diello P., Paturel J. E., Barbier B., Karambiri H., Dezetter A., & Rouché N. (2010). Baisse des pluies et augmentation des écoulements au Sahel : impact climatique et anthropique sur les écoulements du Nakambe au Burkina Faso. *Sécheresse*, 21(4), 330-332.
- Maley J. (1996). Fluctuations majeures de la forêt dense humide africaine au cours des vingt derniers millénaires. *Alimentation en forêt tropicale : interactions bioculturelles*, 22 p.
- Mann H.B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3): 245-259.
- Mballo I., Sy O. & Faye C. (2019). Variabilité climatique et productions vivrières en Haute Casamance (Sud-Sénégal). *Espace Géographique et Société Marocaine*, (28): 1-18.
- Mémoire Online - Diagnostic minéral d'un sol de bas- fond secondaire développé sur matériaux granito-gneissiques en région Centre de la Côte d'Ivoire : essai comportemental de riziculture irriguée - Kouame Firmin KONAN *Memoire Online*.
- Mettin J.L. (1994). Calcul de la lame d'eau précipitée sur le bassin versant de l'Oubangui à Mongoumba (1972-1992). Mémoire de Maîtrise en Géographie, Université de Bangui, Centrafrique, 135 p.
- Milly P.C., Dunne K.A. & Vecchia A.V. (2005). Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438(7066): 347-350.
- Monteny B.A. (1986). Forêt équatoriale, relais de l'océan comme source de vapeur d'eau pour l'atmosphère. *Veille climatique satellitaire*, 12: 39-51.
- Monteny B.A., Barbier J.M. & Bernos C.M. (1985). Determination of the Energy Exchanges of a Forest-Type Culture: Hevea Brasiliensis. In: *The Forest-Atmosphere Interaction*, eds Hutchison B.A. & Hicks B.B., Springer Netherlands, pp 211-233.
- Morin G., Paquet P. & Sochanski W. (1995). Le modèle de simulation de quantité et de qualité CEQUEAU, Manuel de références. INRS-Eau rapport de recherche n° 433, 341 p.

- Morin G. & Paquet P. (2007). Modèle hydrologique CEQUEAU, INRS-ETE, rapport de recherche no R000926, 458 p.
- Moron V. (1994). Variabilité des précipitations en Afrique au nord de l'équateur (1933-1990) et relation avec les températures de surface océanique et dynamique de l'atmosphère. Thèse de Doctorat en Géographie et climatologie, Université de Bourgogne, France, 219 p.
- Moron, V., Robertson, A. W., Ward, M. N., & Camberlin, P. (2007). Spatial coherence of tropical rainfall at the regional scale. *Journal of Climate*, 20(21), 5244-5263.
- Moron V., Robertson A.W. & Boer R. (2009). Spatial Coherence and Seasonal Predictability of Monsoon Onset over Indonesia. *Journal of Climate*, 22(3): 840-850.
- M'Po Y.N., Lawin A.E., Oyerinde G.T., Yao B.K. & Afouda A.A. (2016). Comparison of daily precipitation bias correction methods based on four regional climate model outputs in Ouémé Basin, Bénin. *Hydrology*, 4(6): 58-71.
- Nalbantis I. & Tsakiris G. (2009). Assessment of Hydrological Drought Revisited. *Water Resources Management*, 23(5): 881-897.
- N'Dri W.K.C., Pistre S., Jourda J.P. & Kouamé K.J. (2019). Estimation of the impact of climate change on water resources using a deterministic distributed hydrological model in Côte d'Ivoire: Case of the Aghien Lagoon. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 7(7): 74-91.
- N'Guessan B., Oga Y.M.S., Yao A. F. & Bh K. (2018). Caractérisation de la sécheresse météorologique dans la région de la Marahoué (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire) : apport de l'indice standardise de Précipitation (SPI). *Larhyss Journal*, (33) : 41-50.
- N'Guessan K.J.Y. (2025). Impact du changement climatique sur le riz irrigué et stratégies d'adaptation dans le département de Yamoussoukro au Centre de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat en Géosciences et environnement, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire, 329 p.
- N'Guessan Y. (2002). L'évolution des rendements sur les périmètres de riziculture irriguée de Côte d'Ivoire. International Rice Commission Newsletter (FAO) Bulletin de la Commission Internationale du Riz (FAO) Noticiario de la Comision Internacional del Arroz (FAO), 51 p.
- Nicholson S. E. (1980). La nature des fluctuations des précipitations en Afrique de l'Ouest subtropicale. *Revue Météorologique Mensuelle*, 108(4), 473-487.
- Nicholson S.E. (1981). Rainfall and atmospheric circulation during drought periods and wetter years in West Africa. *Monthly Weather Review*, 109(10): 2191-2208.
- Nicholson S.E. (1986). The Spatial Coherence of African Rainfall Anomalies: Interhemispheric Teleconnections. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 25(10): 1365-1381.
- Nini F. & Mebarki A. (2020). L'efficience de l'utilisation de l'eau d'irrigation : cas du périmètre de Guelma-Bouchehouf, Algérie. *La Houille Blanche*, 106(2): 5-13.

- Nooufé D., Lidon B., Mahé G., Servat E., Brou Yao T., Bi Zueli K. & Chaléard J.-L. (2011). Variabilité climatique et production de maïs en culture pluviale dans l'est Ivoirien. *Hydrological Sciences Journal*, 56(1): 152-167.
- Nooufé D., Kouadio Z.A., Soro G.E., Wayou T.P., Goula B.T.A. & Savané I. (2015). Impact de la variabilité climatique sur la production du maïs et de l'igname en Zones Centre et Nord de la Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 27(3) : 241-255.
- Olivry J.-C., Bricquet J.-P. & Mahe G. (1993). Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide? *IAHS*, 206 : 67-76.
- Olivry J.-C., Bricquet J.-P., Bamba F. & Diarra M. (1994). Le régime hydrologique du Niger supérieur et le déficit des deux dernières décennies. Quelques données préliminaires sur l'environnement et la qualité des apports du Niger au Sahel, 252 : 9-25.
- Olivry J.-C., Bricquet J.-P. & Mahe G. (1998). Variabilité de la puissance des crues des grands cours d'eau d'Afrique intertropicale et incidence de la baisse des écoulements de base au cours des deux dernières décennies. *IAHS publication*, 242 : 189-198.
- Omotosho J.B., Balogun A.A. & Ogunjobi K. (2000). Predicting monthly and seasonal rainfall, onset and cessation of the rainy season in West Africa using only surface data. *International Journal of Climatology*, 20(8): 865-880.
- Op de Hipt F. (2018). Modeling climate and land use change impacts on water resources and soil erosion in the Dano catchment (Burkina Faso, West Africa). Thèse de Doctorat de la Faculté des sciences mathématiques et naturelles, Universitäts-und Landesbibliothek Bonn, Köln, Deutschland, 175 p.
- Oram P.A. (1989). Sensitivity of agricultural production to climatic change, an update. Colloque international sur la variabilité du climat et la sécurité alimentaire dans les pays en développement, New Delhi (Inde), 5-9 février 1987 : In Climat et sécurité alimentaire, Institut international de recherche sur le riz, Los Banos, Laguna (Philippines) ; American Association for the Advancement of Science, Washington, D.C. (USA). Los Banos, Laguna (Philippines). 25-44 p.
- Panthou G., Vischel T., Lebel T., Blanchet J., Quantin G. & Ali A. (2012). Extreme rainfall in West Africa: A regional modeling. *Water Resources Research*, 48(8): 6-20.
- Ouédé G. B. (2024). Evaluation spatio-temporelle des ressources en eau pour l'optimisation de la production de la canne à sucre : cas des complexes sucriers de Ferkéssédougou, Nord de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat en Géosciences et Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé Daloa (Côte d'Ivoire), 253 p.
- Ozer P., Erpicum M., Demarée G. & Vandiepenbeeck M. (2003). The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Hydrological Sciences Journal*, 48(3): 489-492.
- Paturel J.-E., Servat É., Kouame B., Boyer J.-F., Lubes H. & Masson J.-M. (1995). Manifestations de la sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin. *Sécheresse*, 6(1) : 95-102.

- Paturol J.E., Servat E., Delattre M.O. & Lubès-Niel H. (1998). Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrological Sciences Journal*, 43(6): 937-946.
- Payan J.-L. (2007). Prise en compte de barrages-réservoirs dans un modèle global pluie-débit. Thèse de Doctorat en Sciences de l'eau, École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts (AgroParisTech) Paris, 258 p.
- Péné C.B. & Koulibaly S.G. (2007). Les rendements de la canne à sucre en Côte d'Ivoire sont influencés par le bilan hydrique du sol sur deux stades de croissance critiques. XXVIe Congrès, International Society of Sugar Cane Technologists, ICC, Durban, Afrique du Sud, 29 juillet - 2 août 2007, pp 504-511.
- Pérez-Vega A., Mas J.-F. & Ligmann-Zielinska A. (2012). Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest. *Environmental Modelling & Software*, 29(1): 11-23.
- PNUD (2004). Programme d'Appui à la Réduction de la Pauvreté, Sous-Programme Protection de l'Environnement et Gestion Durable des Ressources Naturelles. Document de projet, 19 p.
- Prades A., Mendez del Villar P., Tharreau D., Gérardeaux E., Ducrot R., Ripoche A., Pot D., Tékété M.L., Diatta C., Laplaze L., Parent B., Basile-Doelsch I., Granier C., Adam M., Dusserre J., Vaksmann M., Christina M., Poser C., Bachelier B. & Loison R. (2025). Les grandes cultures et le changement climatique : les cas des filières riz, sorgho, canne à sucre et coton. In: *L'agriculture et les systèmes alimentaires du monde face au changement climatique. Enjeux pour les Suds*, eds Vincent (ed.) B. Julien (ed.) D. & Marie (ed.) H., Ed. Quae, pp. 221–240.
- Pontius R.G. (2000). Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 66(8): 1011-1016.
- Pontius R.G. & Millones M. (2011). Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 32(15): 4407-4429.
- Pouyaud B. (1986). Estimation des apports annuels et des étiages, avant et après la récente phase de sécheresse, de la Volta Noire à Nounbiel, et de la Volta Blanche à Bagré. In: Colloque sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidents de la sécheresse, Ouagadougou, Burkina Faso, 16 p.
- Pyrce R. (2004). Énergie Hydraulique, Centrales Hydroélectriques, Bassins Versants, Débit, Érosion. Méthodes de Calcul en Hydrologie, Flux, Habitat, Trent University, Peterborough, (Canada), Centre des sciences du bassin versant, 50 p.
- Rakotomalala R. (2012). Analyse de corrélation. Étude des dépendances–Variables quantitatives (Version 1.1.). Université Lumière Lyon 2, 105 p.
- Renard B., Kavetski D., Kuczera G., Thyer M. & Franks S.W. (2010). Understanding predictive uncertainty in hydrologic modeling: The challenge of identifying input and structural errors. *Water Resources Research*, 46(5): 134-152.

- Reyniers F. & Forest F. (1990). La pluie n'est pas le seul remède à la sécheresse en Afrique. Les flux hydriques dans le système sol-culture-atmosphère en zone intertropicale. *Sécheresse*, 1 (1): 36-43.
- RGPH (2014) Recensement général de la population et de l'habitat. Institut National de la Statistique (INS). Abidjan, Cote d'Ivoire, 50 p.
- Robin R. (1999). Le remembrement rural dans le Morbihan et ses conséquences. Thèse de doctorat. Université Rennes 2, France, 135 p.
- Rodier J.A. (1964). Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'Ouest du Congo. ORSTOM, Paris, France, 163 p.
- Rodier J.A. & Ribstein P. (1986). Transposition des données hydrologiques, utilisation des bassins représentatifs pour la prédétermination des crues et l'estimation des apports au Sahel. In: *La révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse*, 47 p.
- Roudier P., Sultan B., Quirion P. & Berg A. (2011). The impact of future climate change on West African crop yields: What does the recent literature say? *Global environmental change*, 21(3): 1073-1083.
- Salack S., Klein C., Giannini A., Sarr B., Worou O.N., Belko N., Bliedernicht J. & Kunstman H. (2016). Global warming induced hybrid rainy seasons in the Sahel. *Environmental Research Letters*, 11(10): 104-121.
- Sanjay J., Krishnan R., Shrestha A.B., Rajbhandari R. & Ren G.-Y. (2017). Downscaled climate change projections for the Hindu Kush Himalayan region using CORDEX South Asia regional climate models. *Advances in Climate Change Research*, 8(3): 185-198.
- Sarr A.B. & Camara M. (2017). Evolution des indices pluviométriques extrêmes par l'analyse de modèles climatiques régionaux du programme cordex: les projections climatiques sur le Sénégal. *European Sciences Journal*, 13(17): 206.
- Sarr B. (2007). Manuel d'utilisation destiné aux ingénieurs en agrométéorologie. *Centre Régional AGHYMET, Niamey*, 72 p.
- Seneviratne S.I., Donat M.G., Pitman A.J., Knutti R. & Wilby R.L. (2016). Allowable CO2 emissions based on regional and impact-related climate targets. *Nature*, 529(7587): 477-483.
- Servat E., Kouamé B., Travaglio M. & Lubes H. (1998). Variabilité des régimes pluviométriques et hydrologiques en cette fin de siècle en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Sud Sciences et technologie*, 2 :44-52
- Servat E., Paturel J.-E., Kouame B., Travaglio M., Lubes H., Marieu B., Fritsch J.-M. & Masson J.-M. (1997a). Modification des régimes d'écoulement en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne et conséquences sur les ressources en eau. *IAHS PUBLICATION*, 241-248.

- Servat E., Paturel J.-E., Kouame B., Travaglio M., Ouedraogo M., Boyer J.-F., Lubes-Niel H., Fritsch J.-M., Masson J.-M. & Marieu B. (1998). Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. *IAHS PUBLICATION*, (252) : 323-338.
- Servat E., Paturel J.-E., Lubès-Niel H., Kouamé B. & Masson J.-M. (1997). Variabilité des régimes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 324(10) : 835-838.
- Servat E. & Sakho M. (1995). Instability of water resources and management of a planned water system in non-sahelian West Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 40(2): 217-230.
- Seydou D., Dabissi E.N., Armand T.B.Z., Amidou D., Lanciné G.D., Serge T.K.E. & Thierry K.J. (2018). Effets de la dynamique du couvert végétal sur les écoulements dans le bassin versant de la lagune Aghien en Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal ESJ*, 14 (7): 36-50.
- Shen Y., Li S., Chen Y., Qi Y. & Zhang S. (2013). Estimation of regional irrigation water requirement and water supply risk in the arid region of Northwestern China 1989–2010. *Agricultural Water Management*, 128: 55-64.
- Shinoda M. (1990). Long-term variability of the tropical African rainbelt and its relation to rainfall in the Sahel and northern Kalahari. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 68(1): 19-35.
- Sigha-Nkamdjou L., Sighomnou D. & Lienou G. (2002). Vers une approche globale de la gestion de la ressource comme solution aux crises d'eau des dernières décennies au Cameroun. *IAHS-AISH publication*, 13 (5) : 337-343.
- Sircoulon J. (1976). La récente sécheresse des régions sahéliennes. *La Houille Blanche*, 62(6-7): 537-548.
- Sircoulon J. & Olivry J.-C. (1986). Caractéristiques de la sécheresse actuelle en Afrique de l'Ouest et centrale (Considération sur les stations pluviométriques de longue durée et les débits des rivières). *Colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de sécheresse. Ouagadougou, Burkina Faso*, 24 p.
- Sivakumar M.V.K. (1988). Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agricultural and forest meteorology*, 42(4): 295-305.
- Skhiri A. (2019). Les bases de l'irrigation : calcul des besoins en eau. Edition Universitaire Européennes. 106 p.
- Smakhtin V.U. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240(3-4): 147–186.
- Some'e B. S., Ezani, A., & Tabari, H. (2012). Spatio-temporal trends and change point of precipitation in Iran. *Atmospheric Research*, 113 (4), 1-12.

- Soro G.E., Anouman D.G.L., BI T.G., Srohorou B. & Savané I. (2014). Caractérisation des séquences de sécheresse météorologique à diverses échelles de temps en climat de type soudanais: cas de l'extrême Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. *LARHYSS Journal*, 18: 2521-9782.
- Soro G.E., Yao A.B., Kouamé Y.M. & Bi T.A.G. (2017). Climate change and its impacts on water resources in the Bandama basin, Côte d'Ivoire. *Hydrology*, 4(1): 1-18.
- Soro T. D., Kouakou B. D., Kouassi E. A., Soro G., Kouassi A. M., Kouadio K. E., & Soro, N. (2013). Hydroclimatologie et dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire). *VertigO*, 13(3): 1-26.
- Stanzel P., Kling H. & Bauer H. (2018). Climate change impact on West African rivers under an ensemble of CORDEX climate projections. *Climate Services*, 11: 36-48.
- Suchel J.-B. (1987). Les climats du Cameroun. Thèse de Doctorat en Géographie tropicale, Université de Bordeaux 3, Bordeaux, France, 186 p.
- Sultan B., Servat E., Maley J. & Mahé G. (2001). Interrelations entre les forêts tropicales et la variabilité climatique: une synthèse des études récentes. *Sécheresse*, 12(4): 221-229.
- Sultan B., Roudier P. & Traoré S. (2015). Les impacts du changement climatique sur les rendements agricoles en Afrique de l'Ouest. In: Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest, eds Sultan B. Lalou R. Amadou Sanni M. Oumarou A. & Soumaré M.A., IRD Éditions, pp. 209-225.
- Sun S., Zhang C., Li X., Zhou T., Wang Y., Wu P. & Cai H. (2017). Sensitivity of crop water productivity to the variation of agricultural and climatic factors: a study of Hetao irrigation district, China. *Journal of Cleaner Production*, 142: 2562-2569.
- Sylla M.B., Faye A., Klutse N.A.B. & Dimobe K. (2018). Projected increased risk of water deficit over major West African river basins under future climates. *Climatic Change*, 151(2): 247-258.
- Tabari H., Somee B.S. & Zadeh M.R. (2011). Testing for long-term trends in climatic variables in Iran. *Atmospheric Research*, 100(1): 132-140.
- Taibi H. & Haddad M. (2019). Estimating trends of the Mediterranean Sea level changes from tide gauge and satellite altimetry data (1993–2015). *Journal of Oceanology and Limnology*, 37(4): 1176-1185.
- Taibi S., Meddi M., Mahé G. & Assani A. (2017). Relationships between atmospheric circulation indices and rainfall in Northern Algeria and comparison of observed and RCM-generated rainfall. *Theoretical and Applied Climatology*, 127(1-2): 241-257.
- Tanaka M., Weare B.C., Navato A.R. & Newell R.E. (1975). Recent African rainfall patterns. *Nature*, 255(5505): 201-203.
- Traoré K. (2019). Le couvert forestier en Côte d'Ivoire : une analyse critique de la situation de gestion des forêts (classées, parcs et réserves). *The International Journal of Social Sciences and Humanities Invention*, 5(2): 4387-4397.

- Traoré K., N’Gouan C. & Dembele I. (1995). Etude d'impact environnementale dans le bassin du Haut Sassandra. Programme de Lutte contre l'Onchocercose en Afrique de l'Ouest. African Programme for Onchocerciasis Control, 67 p.
- Touré F. (2023). Optimisation de l'allocation de l'eau dans le bassin versant de la Lobo à Nibéhibé (Centre Ouest de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat en Géosciences et environnement, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire, 169 p.
- Touré I., Ndione D. M., Leye I., Sambou M. H. A. & Sane, M. L. (2022). Analyse des tendances dans les séries pluviométriques au Sénégal. *Afrique SCIENCE*, 21(1): 122-135.
- Turc, L., (1961). Evaluation des besoins en eau d’irrigation, évapotranspiration potentielle. *Annuaire Agronomie*, 12 (1): 13-50.
- Twisa S., Kazumba S., Kurian M. & Buchroithner M.F. (2020). Evaluating and predicting the effects of land use changes on hydrology in Wami river basin, Tanzania. *Hydrology*, 7(1): 17-27.
- Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I., Angulo M. & El Kenawy A. (2010). A new global 0.5 gridded dataset (1901–2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the Palmer Drought Severity Index. *Journal of Hydrometeorology*, 11(4): 1033-1043.
- Volpi E., Di Lazzaro M. & Fiori A. (2012). A simplified framework for assessing the impact of rainfall spatial variability on the hydrologic response. *Advances in Water Resources*, 46: 1-10.
- Walter M.W. (1967). Length of the rainy season in Nigeria. *The Nigerian Geographical Journal*, 10(2): 123-128.
- Carvalho A.L., Menezes R.S.C., Nóbrega R.S., Pinto A. de S., Ometto J.P.H.B., Von Randow C. & Giarolla A. (2015). Impact of climate changes on potential sugarcane yield in Pernambuco, northeastern region of Brazil. *Renewable Energy*, 78: 26–34.
- Daugrois J.H., Champoiseau P & P. Rott. (2007). Analyse de risques et impact sur la gestion des maladies, le cas de l’échaudure des feuilles de la canne à sucre en Guadeloupe.
- Douared Myriam. (2004). Sélection variétale de la canne à sucre : approche statistique. Programme européen DOCUP 2000-2006. Contrat d'entreprise du Cirad-Ca - 2ème tranche - Année 2004. Programme de travaux d'appui au développement de la canne à sucre en Guadeloupe. Montpellier : CIRAD, 37 p.
- Goebel F.-R. & Sallam N. (2011). New pest threats for sugarcane in the new bioeconomy and how to manage them. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(1–2): 81–89.
- Gomathi R., Gururaja Rao P.N., Chandran K. & Selvi A. (2015). Adaptive Responses of Sugarcane to Waterlogging Stress: An Over View. *Sugar Tech*, 17(4): 325–338.
- Hamon P., Glaszmann J.-C., Perrier X. & Seguin M. (1999). Diversité génétique des plantes tropicales cultivées. Éditions Quae : 1–388.

- Jones M.R., Singels A. & Ruane A.C. (2015). Simulated impacts of climate change on water use and yield of irrigated sugarcane in South Africa. *Agricultural Systems*, 139: 260–270.
- Linnenluecke M.K., Nucifora N. & Thompson N. (2018). Implications of climate change for the sugarcane industry. *WIREs Climate Change*, 9(1) : 498.
- Prades A., Mendez del Villar P., Tharreau D., Gérardeaux E., Ducrot R., Ripoche A., Pot D., Tékété M.L., Diatta C., Laplaze L., Parent B., Basile-Doelsch I., Granier C., Adam M., Dusserre J., Vaksman M., Christina M., Poser C., Bachelier B. & Loison R. (2025). Les grandes cultures et le changement climatique : les cas des filières riz, sorgho, canne à sucre et coton. In: *L'agriculture et les systèmes alimentaires du monde face au changement climatique. Enjeux pour les Suds*, eds Vincent (ed.) B. Julien (ed.) D. & Marie (ed.) H., Ed. Quae, pp. 221–240.
- Warren R., Price J., Forstenhäusler N., Andrews O., Brown S., Ebi K., Gernaat D., Goodwin P., Guan D., He Y., Manful D., Yin Z., Hu Y., Jenkins K., Jenkins R., Kennedy-Asser A., Osborn T.J., VanVuuren D., Wallace C., Wang D., et al. (2024). Risks associated with global warming of 1.5 to 4 °C above pre-industrial levels in human and natural systems in six countries. *Climatic Change*, 177(3): 48.
- Webster P.J., Holland G.J., Curry J.A. & Chang H.-R. (2005). Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment. *Science*, 309(5742): 1844-1846.
- Yabi J.A., Paraïso A., Yegbemey R.N. & Chanou P. (2012). Rentabilité économique des systèmes rizicoles de la commune de Malanville au Nord-est du Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*, 12 p.
- Yao A.B., Goula B.T.A., Kouadio Z.A., Kouakou K.E., Kane A. & Sambou S. (2012). Analyse de la variabilité climatique et quantification des ressources en eau en zone tropicale humide. Cas du bassin versant de la Lobo au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Revue Ivoirien des Sciences et Technologie*, 19: 136-157.
- Yao A. B. (2015). Evaluation des potentialités en eau du bassin versant de la Lobo en vue d'une gestion rationnelle (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat en Géosciences et environnement, Université Nangui Abrogoua, Abidjan (Côte d'Ivoire), 192 p.
- Yao A.B., Kouassi K.L., Kouakou K.E., Goula B.T.A. & Gaye A.T. (2019). Évaluation des impacts potentiels des changements climatiques sur les écoulements de la rivière Lobo, Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Afrique Science*, 15(4): 330-342.
- Yao A.B., Kouassi K.L., Kouakou K.E., Goula B.T.A. & Gaye A.T. (2019b). Évaluation des impacts potentiels des changements climatiques sur les écoulements de la rivière Lobo, Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Afrique Science*, 15(4): 330-342.
- Yao T. B., Servat E. & Paturel J.E. (1998). Activités humaines et variabilité climatique : cas du sud forestier ivoirien. *International Association of Hydrological Sciences*, 14(7) : 365-374.

- Yegbemey R.N., Yabi J.A., Aïhounon G.B. & Paraïso A. (2014). Modélisation simultanée de la perception et de l'adaptation au changement climatique : cas des producteurs de maïs du Nord Bénin (Afrique de l'Ouest). *Cahiers Agricultures*, 23(3): 177-187.
- Yéo W.E. (2017). Effects of Climate Change and Human Activities on Water Resources in the Comoe River Basin (West Africa). Thèse de Doctorat en Philosophie du Changement Climatique et des Ressources en Eau, Université Abomey Calavi, Cotonou, Bénin, 214 p.

ANNEXES

Annexe 1 : Débits caractéristiques d'étiage en m³/s dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona

| | | 1970 | 1971 | 1972 | 1973 | 1974 | 1975 | 1976 | 1977 | 1978 | 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 |
|----------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| DMAX | 1 | 1150,0 | 754,0 | 508,0 | 342,0 | 736,0 | 609,0 | 620,0 | 691,0 | 511,8 | 1050,0 | 577,0 | 773,0 | 675,0 | 370,0 | 609,0 | 758,0 | 455,0 | 497,0 | 728,0 | 578,0 | 347,0 |
| DCC_10j | 10 | 813,0 | 626,0 | 370,0 | 289,0 | 665,0 | 542,0 | 479,0 | 568,0 | 393,0 | 880,0 | 485,0 | 672,0 | 595,0 | 291,0 | 451,0 | 692,0 | 318,3 | 348,0 | 584,0 | 455,0 | 311,0 |
| DCC_20j | 20 | 608,0 | 543,5 | 328,0 | 235,0 | 539,0 | 483,0 | 442,0 | 439,0 | 353,5 | 640,0 | 442,0 | 586,0 | 535,0 | 241,0 | 321,0 | 600,0 | 293,0 | 317,0 | 531,0 | 425,0 | 263,0 |
| DC1 | 30.5 | 507,0 | 451,5 | 177,0 | 203,0 | 288,0 | 379,0 | 378,0 | 366,0 | 338,5 | 555,0 | 362,0 | 521,0 | 477,0 | 220,0 | 262,0 | 556,9 | 248,0 | 285,0 | 474,0 | 380,0 | 240,0 |
| DC2 | 61 | 187,0 | 200,0 | 123,0 | 136,0 | 179,0 | 202,0 | 281,0 | 245,0 | 296,5 | 430,0 | 233,0 | 389,0 | 311,0 | 143,0 | 184,0 | 323,0 | 194,0 | 164,0 | 254,0 | 240,0 | 166,0 |
| DC3 | 91.5 | 131,0 | 82,1 | 68,5 | 90,2 | 138,0 | 110,0 | 155,0 | 111,0 | 231,2 | 255,0 | 147,0 | 241,0 | 184,0 | 76,0 | 124,0 | 187,0 | 126,0 | 54,9 | 121,0 | 173,1 | 95,1 |
| DC4 | 122 | 71,3 | 47,5 | 44,5 | 35,3 | 92,5 | 67,2 | 109,5 | 64,2 | 110,5 | 146,0 | 86,1 | 126,0 | 130,0 | 57,6 | 80,6 | 98,4 | 71,5 | 41,2 | 61,9 | 81,4 | 57,6 |
| DC5 | 152.5 | 54,5 | 36,5 | 30,8 | 25,8 | 42,6 | 53,0 | 71,0 | 50,5 | 59,0 | 94,8 | 64,1 | 68,5 | 89,9 | 39,2 | 51,7 | 50,7 | 33,0 | 29,7 | 35,9 | 37,9 | 44,4 |
| Médiane | 183 | 39,3 | 28,8 | 26,6 | 22,9 | 24,9 | 38,7 | 54,8 | 39,1 | 49,7 | 63,8 | 45,0 | 45,1 | 64,1 | 28,8 | 29,6 | 27,8 | 20,1 | 24,6 | 23,8 | 22,5 | 35,5 |
| DC7 | 213.5 | 32,7 | 20,8 | 22,8 | 19,0 | 17,8 | 30,5 | 43,5 | 31,7 | 40,1 | 48,3 | 38,2 | 36,4 | 42,8 | 23,8 | 23,0 | 18,5 | 16,2 | 16,0 | 18,1 | 14,2 | 21,3 |
| DC8 | 244 | 29,2 | 17,8 | 19,6 | 12,6 | 10,1 | 16,8 | 30,2 | 26,4 | 31,0 | 33,9 | 30,3 | 26,8 | 29,1 | 20,3 | 13,8 | 12,6 | 14,6 | 13,3 | 10,3 | 9,4 | 15,2 |
| DC9 | 274.5 | 26,0 | 13,2 | 17,2 | 9,6 | 6,3 | 12,6 | 22,8 | 21,4 | 24,1 | 20,7 | 26,4 | 17,6 | 20,2 | 15,6 | 8,8 | 6,2 | 13,0 | 10,2 | 7,3 | 7,1 | 8,7 |
| DC10 | 305 | 23,3 | 10,0 | 11,9 | 6,3 | 5,3 | 8,9 | 15,3 | 9,9 | 19,2 | 14,3 | 17,1 | 11,2 | 13,9 | 13,0 | 5,5 | 4,9 | 10,5 | 7,8 | 5,0 | 5,7 | 4,5 |
| DC11 | 335.5 | 18,5 | 9,0 | 7,8 | 5,2 | 3,6 | 3,0 | 12,2 | 6,7 | 10,7 | 9,0 | 13,1 | 7,0 | 9,6 | 7,1 | 4,4 | 3,9 | 8,5 | 6,4 | 3,9 | 5,2 | 3,0 |
| DCE_20j | 345 | 17,1 | 8,5 | 6,7 | 4,2 | 3,1 | 2,7 | 11,3 | 6,0 | 9,0 | 8,1 | 12,3 | 6,4 | 9,1 | 5,7 | 3,8 | 3,6 | 7,5 | 5,4 | 3,0 | 4,6 | 2,3 |
| DCE_10j | 355 | 15,7 | 7,0 | 5,7 | 2,8 | 3,0 | 2,2 | 9,1 | 4,4 | 8,0 | 6,6 | 11,4 | 5,3 | 6,7 | 5,0 | 3,5 | 3,1 | 6,9 | 3,6 | 2,4 | 4,1 | 2,0 |
| DMIN | 365 | 9,5 | 6,6 | 4,7 | 2,5 | 2,5 | 0,8 | 6,6 | 3,6 | 6,6 | 4,9 | 7,4 | 3,4 | 5,9 | 3,8 | 3,1 | 2,8 | 5,7 | 3,0 | 2,1 | 3,6 | 1,9 |
| VCN_3 | 3 | 27,4 | 15,3 | 16,9 | 11,2 | 8,5 | 13,1 | 24,4 | 17,4 | 22,0 | 22,3 | 23,7 | 19,6 | 19,4 | 16,3 | 10,8 | 8,7 | 12,2 | 9,4 | 7,2 | 8,3 | 12,7 |
| VCN_5 | 5 | 27,0 | 15,2 | 16,7 | 11,1 | 8,5 | 12,9 | 24,3 | 17,2 | 22,0 | 22,2 | 23,5 | 19,4 | 19,3 | 16,2 | 10,8 | 8,6 | 12,1 | 9,3 | 7,1 | 8,2 | 12,6 |
| VCN_7 | 7 | 26,7 | 15,0 | 16,5 | 11,0 | 8,5 | 12,7 | 24,2 | 16,9 | 21,9 | 22,0 | 23,4 | 19,2 | 19,3 | 16,0 | 10,7 | 8,5 | 12,1 | 9,2 | 7,1 | 8,2 | 12,4 |
| VCN_10 | 10 | 26,4 | 14,7 | 16,3 | 10,7 | 8,5 | 12,3 | 24,0 | 16,6 | 21,8 | 21,8 | 23,3 | 18,9 | 19,3 | 15,7 | 10,6 | 8,4 | 12,0 | 9,1 | 7,0 | 8,1 | 12,1 |

| | | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2018 | 2019 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| DMAX | 1 | 480,0 | 426,0 | 458,0 | 783,0 | 654,0 | 601,0 | 615,0 | 640,0 | 998,0 | 696,0 | 694,0 | 814,0 | 592,0 | 815,0 | 588,0 | 783,0 | 557,0 | 963,0 | 624,0 | 793,0 |
| DCC_10j | 10 | 385,0 | 314,0 | 417,0 | 739,0 | 548,0 | 513,0 | 544,0 | 587,0 | 661,0 | 527,0 | 626,0 | 812,0 | 445,0 | 805,0 | 528,0 | 727,0 | 456,0 | 666,0 | 510,0 | 760,0 |
| DCC_20j | 20 | 340,0 | 293,0 | 360,0 | 653,0 | 482,0 | 415,0 | 436,0 | 542,0 | 556,0 | 466,0 | 578,0 | 807,0 | 338,0 | 755,0 | 489,0 | 658,0 | 431,0 | 570,0 | 421,0 | 724,0 |
| DC1 | 30.5 | 254,0 | 275,0 | 317,0 | 598,0 | 459,0 | 343,0 | 382,0 | 503,0 | 515,0 | 437,0 | 450,0 | 765,0 | 317,0 | 677,0 | 449,0 | 577,5 | 409,0 | 468,0 | 358,0 | 652,0 |
| DC2 | 61 | 164,0 | 254,0 | 214,2 | 489,0 | 369,0 | 221,0 | 305,0 | 405,0 | 426,0 | 370,1 | 310,0 | 573,0 | 178,0 | 414,0 | 341,0 | 404,0 | 311,0 | 341,0 | 221,0 | 504,0 |
| DC3 | 91.5 | 127,0 | 160,0 | 119,0 | 182,0 | 158,0 | 124,0 | 181,0 | 278,7 | 180,0 | 230,0 | 140,0 | 321,0 | 120,0 | 327,0 | 258,0 | 253,0 | 177,0 | 196,0 | 169,0 | 326,0 |
| DC4 | 122 | 75,2 | 76,4 | 67,4 | 97,7 | 95,9 | 93,3 | 140,0 | 116,0 | 117,0 | 115,0 | 92,8 | 191,0 | 93,2 | 196,0 | 127,0 | 175,0 | 103,5 | 103,0 | 118,0 | 145,0 |
| DC5 | 152.5 | 53,2 | 55,9 | 48,6 | 68,3 | 50,2 | 60,0 | 104,0 | 79,6 | 68,0 | 86,0 | 65,4 | 124,0 | 69,3 | 114,0 | 93,0 | 111,0 | 59,5 | 76,2 | 63,2 | 93,2 |
| Médiane | 183 | 30,5 | 39,5 | 36,9 | 51,7 | 41,0 | 43,4 | 49,5 | 55,4 | 37,6 | 62,3 | 38,2 | 54,1 | 40,1 | 57,0 | 65,1 | 78,5 | 38,2 | 55,1 | 38,2 | 57,4 |
| DC7 | 213.5 | 22,0 | 21,3 | 26,9 | 22,1 | 35,2 | 28,5 | 38,5 | 35,9 | 24,1 | 50,3 | 30,1 | 30,6 | 26,8 | 35,5 | 46,0 | 45,8 | 32,4 | 38,7 | 27,8 | 37,0 |
| DC8 | 244 | 17,1 | 12,6 | 20,0 | 14,7 | 30,2 | 21,8 | 29,1 | 25,3 | 19,1 | 41,7 | 24,9 | 18,8 | 21,8 | 23,2 | 31,1 | 29,6 | 27,6 | 23,5 | 20,6 | 17,8 |
| DC9 | 274.5 | 13,3 | 9,2 | 15,6 | 12,5 | 25,4 | 18,3 | 22,4 | 20,0 | 15,8 | 27,6 | 19,7 | 16,3 | 16,9 | 17,2 | 26,5 | 20,2 | 23,8 | 18,3 | 16,1 | 11,7 |
| DC10 | 305 | 7,5 | 6,0 | 9,7 | 9,8 | 20,5 | 15,5 | 14,3 | 13,0 | 12,3 | 16,5 | 16,0 | 13,1 | 13,6 | 13,8 | 17,8 | 13,7 | 18,5 | 15,0 | 10,6 | 9,5 |
| DC11 | 335.5 | 5,1 | 4,7 | 7,3 | 7,4 | 15,2 | 11,2 | 5,0 | 5,6 | 9,3 | 12,1 | 10,4 | 10,8 | 10,3 | 11,1 | 10,2 | 10,8 | 13,7 | 10,9 | 7,5 | 8,8 |
| DCE_20j | 345 | 4,8 | 4,5 | 6,3 | 6,9 | 13,1 | 10,2 | 4,5 | 4,2 | 7,5 | 9,4 | 9,2 | 9,5 | 9,6 | 9,8 | 7,6 | 10,2 | 12,6 | 9,5 | 7,1 | 8,7 |
| DCE_10j | 355 | 4,4 | 4,3 | 5,3 | 6,4 | 11,9 | 9,8 | 3,6 | 3,2 | 6,0 | 7,7 | 7,9 | 8,0 | 7,7 | 7,5 | 5,5 | 7,3 | 11,7 | 7,5 | 6,7 | 8,7 |
| DMIN | 365 | 3,1 | 3,0 | 4,8 | 5,2 | 10,0 | 9,0 | 3,1 | 2,9 | 4,6 | 5,0 | 6,5 | 6,3 | 5,7 | 6,4 | 5,0 | 6,3 | 10,3 | 6,3 | 6,2 | 8,6 |
| VCN_3 | 3 | 13,5 | 8,6 | 14,9 | 11,6 | 26,0 | 17,3 | 22,5 | 19,4 | 15,7 | 26,2 | 18,5 | 15,1 | 17,2 | 17,4 | 22,3 | 20,2 | 22,7 | 22,0 | 17,3 | 14,8 |
| VCN_5 | 5 | 13,1 | 8,5 | 14,8 | 11,6 | 25,8 | 17,2 | 22,4 | 19,1 | 15,5 | 25,8 | 18,4 | 15,0 | 17,1 | 17,2 | 22,0 | 20,0 | 22,5 | 21,8 | 16,9 | 14,6 |
| VCN_7 | 7 | 12,7 | 8,3 | 14,7 | 11,5 | 25,7 | 17,2 | 22,4 | 18,8 | 15,4 | 25,5 | 18,3 | 14,9 | 17,0 | 17,0 | 21,8 | 19,8 | 22,4 | 21,6 | 16,6 | 14,4 |
| VCN_10 | 10 | 12,2 | 8,2 | 14,4 | 11,5 | 25,5 | 17,0 | 22,3 | 18,1 | 15,1 | 25,0 | 18,1 | 14,8 | 16,9 | 16,8 | 21,7 | 19,3 | 22,3 | 21,3 | 16,4 | 14,2 |

Dmax : Débit maximal qui correspond au débit journalier le plus élevé de l'année considérée ;

DCC : Débit caractéristique de crue (DCC) qui correspond au débit journalier qui est dépassé 10 jours par an ;

DCI : Débit caractéristique qui correspond au débit dépassé 1 mois par an (idem pour DC2 (2 mois) à DC11 (11 mois)) ;

DCE : Débit caractéristique d'étiage qui correspond au débit journalier qui n'est pas atteint 10 jours par an.

DMIN : Débit minimum qui correspond au débit le plus bas de l'année considérée.

VCN10 : Débit minimum de l'année calculé sur d jours consécutifs

QMNA : Débit moyen mensuel minimum de l'année

VCN3 : Débits moyens minimums journalières 3 jours consécutifs (idem VCN5 (5 jours consécutifs), VCN7 (7 jours consécutifs) et VNC10 (10 jours consécutifs))

Annexe 2 : Débits moyens journaliers sur la période de calage 1984-1986 (m³/s)

| Jours | Calculé | | | | | | | | | | | | Observé | | | | | | | | | | | |
|-------|---------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|---------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|
| | janv | févr | mars | avr | mai | juin | juil | août | sept | oct | nov | déc | janv | févr | mars | avr | mai | juin | juil | août | sept | oct | nov | déc |
| 1 | 52 | 36 | 16 | 50 | 134 | 206 | 523 | 1443 | 1396 | 868 | 239 | 126 | 116 | 71 | 31 | 52 | 53 | 109 | 162 | 912 | 1567 | 1122 | 628 | 211 |
| 2 | 62 | 35 | 16 | 51 | 145 | 197 | 538 | 1490 | 1354 | 855 | 230 | 118 | 142 | 68 | 36 | 48 | 56 | 107 | 145 | 744 | 1464 | 1219 | 637 | 205 |
| 3 | 62 | 34 | 16 | 54 | 154 | 193 | 545 | 1528 | 1323 | 846 | 223 | 111 | 132 | 64 | 34 | 47 | 58 | 106 | 139 | 742 | 1404 | 1231 | 642 | 197 |
| 4 | 62 | 33 | 15 | 58 | 159 | 193 | 549 | 1549 | 1306 | 835 | 217 | 105 | 113 | 61 | 36 | 43 | 63 | 104 | 137 | 709 | 1423 | 1170 | 640 | 192 |
| 5 | 62 | 32 | 15 | 64 | 163 | 203 | 552 | 1549 | 1296 | 815 | 211 | 100 | 99 | 62 | 31 | 39 | 75 | 113 | 135 | 721 | 1405 | 1099 | 624 | 189 |
| 6 | 62 | 31 | 14 | 70 | 167 | 228 | 553 | 1535 | 1284 | 785 | 206 | 95 | 95 | 58 | 30 | 40 | 81 | 116 | 144 | 696 | 1453 | 1002 | 591 | 186 |
| 7 | 61 | 31 | 14 | 75 | 177 | 273 | 553 | 1514 | 1272 | 747 | 200 | 91 | 86 | 55 | 29 | 38 | 99 | 118 | 175 | 662 | 1516 | 1051 | 569 | 180 |
| 8 | 60 | 31 | 13 | 78 | 195 | 336 | 553 | 1493 | 1270 | 709 | 195 | 87 | 83 | 54 | 27 | 44 | 96 | 130 | 214 | 611 | 1707 | 976 | 554 | 177 |
| 9 | 59 | 31 | 13 | 79 | 215 | 380 | 556 | 1475 | 1277 | 674 | 191 | 84 | 83 | 53 | 28 | 44 | 111 | 132 | 249 | 590 | 1837 | 893 | 536 | 172 |
| 10 | 58 | 31 | 14 | 79 | 231 | 437 | 554 | 1461 | 1285 | 644 | 187 | 81 | 79 | 51 | 30 | 40 | 131 | 148 | 285 | 638 | 1695 | 833 | 506 | 168 |
| 11 | 57 | 31 | 14 | 78 | 246 | 453 | 552 | 1454 | 1288 | 619 | 185 | 79 | 78 | 48 | 32 | 47 | 145 | 147 | 316 | 891 | 1608 | 736 | 480 | 164 |
| 12 | 55 | 31 | 16 | 77 | 266 | 499 | 555 | 1460 | 1282 | 595 | 186 | 76 | 80 | 47 | 34 | 50 | 153 | 166 | 300 | 816 | 1505 | 703 | 452 | 162 |
| 13 | 54 | 30 | 19 | 75 | 295 | 523 | 562 | 1481 | 1268 | 568 | 190 | 74 | 79 | 44 | 35 | 44 | 129 | 159 | 302 | 772 | 1479 | 714 | 424 | 161 |
| 14 | 53 | 20 | 24 | 74 | 336 | 518 | 570 | 1502 | 1242 | 538 | 197 | 72 | 77 | 42 | 34 | 51 | 137 | 156 | 315 | 768 | 1508 | 736 | 392 | 160 |
| 15 | 53 | 23 | 28 | 74 | 384 | 511 | 578 | 1509 | 1206 | 505 | 206 | 70 | 74 | 49 | 34 | 54 | 131 | 159 | 298 | 794 | 1456 | 733 | 365 | 159 |
| 16 | 52 | 28 | 33 | 80 | 431 | 506 | 584 | 1498 | 1165 | 471 | 215 | 68 | 94 | 47 | 34 | 70 | 119 | 157 | 278 | 919 | 1328 | 696 | 350 | 158 |
| 17 | 52 | 28 | 36 | 93 | 472 | 488 | 590 | 1471 | 1128 | 438 | 220 | 67 | 101 | 46 | 30 | 84 | 115 | 153 | 292 | 1078 | 1223 | 683 | 344 | 164 |
| 18 | 52 | 27 | 39 | 110 | 501 | 467 | 598 | 1442 | 1095 | 408 | 219 | 65 | 101 | 44 | 30 | 81 | 107 | 151 | 338 | 1098 | 1168 | 766 | 335 | 154 |
| 19 | 52 | 26 | 41 | 128 | 513 | 442 | 606 | 1425 | 1070 | 383 | 216 | 63 | 106 | 44 | 33 | 79 | 98 | 171 | 396 | 1067 | 1085 | 767 | 330 | 148 |
| 20 | 53 | 26 | 41 | 144 | 509 | 415 | 619 | 1421 | 1058 | 364 | 213 | 62 | 114 | 46 | 32 | 103 | 91 | 217 | 434 | 1259 | 1027 | 760 | 327 | 141 |
| 21 | 54 | 25 | 42 | 154 | 493 | 433 | 645 | 1430 | 1053 | 350 | 210 | 61 | 127 | 43 | 33 | 90 | 89 | 236 | 455 | 1458 | 1025 | 735 | 320 | 136 |
| 22 | 54 | 24 | 42 | 158 | 469 | 440 | 683 | 1455 | 1042 | 342 | 206 | 61 | 137 | 41 | 36 | 76 | 84 | 240 | 525 | 1509 | 1057 | 737 | 306 | 129 |
| 23 | 54 | 24 | 43 | 154 | 441 | 465 | 729 | 1497 | 1018 | 337 | 201 | 61 | 134 | 40 | 40 | 65 | 86 | 249 | 601 | 1551 | 1126 | 718 | 291 | 125 |
| 24 | 54 | 24 | 43 | 146 | 411 | 474 | 797 | 1545 | 986 | 332 | 194 | 61 | 121 | 37 | 41 | 52 | 89 | 230 | 649 | 1616 | 1133 | 725 | 276 | 123 |
| 25 | 53 | 24 | 43 | 135 | 380 | 471 | 896 | 1581 | 957 | 325 | 186 | 61 | 111 | 35 | 42 | 70 | 86 | 206 | 691 | 1635 | 1143 | 731 | 261 | 122 |
| 26 | 52 | 15 | 43 | 123 | 349 | 465 | 1012 | 1591 | 937 | 316 | 176 | 61 | 100 | 34 | 41 | 76 | 71 | 179 | 773 | 1679 | 1105 | 740 | 248 | 138 |
| 27 | 51 | 16 | 43 | 114 | 320 | 465 | 1125 | 1571 | 925 | 304 | 166 | 60 | 91 | 35 | 37 | 77 | 67 | 159 | 776 | 1659 | 1106 | 737 | 239 | 125 |
| 28 | 50 | 16 | 44 | 109 | 291 | 473 | 1222 | 1532 | 916 | 290 | 155 | 60 | 86 | 32 | 47 | 78 | 66 | 147 | 726 | 1715 | 1124 | 697 | 228 | 108 |
| 29 | 49 | 7 | 45 | 112 | 263 | 486 | 1298 | 1493 | 903 | 277 | 145 | 59 | 84 | 14 | 51 | 73 | 67 | 156 | 707 | 1755 | 1177 | 641 | 221 | 104 |
| 30 | 38 | | 47 | 122 | 239 | 504 | 1353 | 1463 | 886 | 263 | 135 | 57 | 77 | | 49 | 69 | 73 | 167 | 781 | 1798 | 1096 | 606 | 216 | 99 |
| 31 | 37 | | 48 | | 220 | | 1396 | 1434 | | 251 | | 56 | 73 | | 53 | | 112 | | 888 | 1619 | | 618 | | 55 |

Annexe 3 : Débits moyens journaliers sur la première période de validation 2001-2005 (m³/s)

| Jour | Débit calculé | | | | | | | | | | | | Débit observé | | | | | | | | | | |
|------|---------------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|---------------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|
| | Janv | Févr | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept | Oct | Nov | Déc | Janv | Févr | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept | Oct | Nov |
| 1 | 68 | 61 | 80 | 216 | 577 | 469 | 804 | 1095 | 1361 | 1127 | 522 | 260 | 149 | 88 | 48 | 69 | 182 | 163 | 386 | 1094 | 2477 | 1949 | 758 |
| 2 | 67 | 56 | 75 | 236 | 553 | 459 | 821 | 1102 | 1347 | 1080 | 492 | 258 | 148 | 86 | 47 | 71 | 154 | 177 | 483 | 1194 | 2488 | 1872 | 743 |
| 3 | 66 | 53 | 73 | 260 | 536 | 460 | 844 | 1109 | 1333 | 1042 | 467 | 255 | 148 | 83 | 44 | 70 | 135 | 172 | 520 | 1416 | 2478 | 1777 | 719 |
| 4 | 65 | 51 | 74 | 284 | 535 | 472 | 872 | 1116 | 1320 | 1009 | 444 | 251 | 144 | 85 | 42 | 71 | 125 | 164 | 493 | 1474 | 2466 | 1758 | 691 |
| 5 | 64 | 50 | 76 | 305 | 545 | 488 | 897 | 1121 | 1316 | 978 | 424 | 243 | 139 | 85 | 40 | 68 | 118 | 157 | 466 | 1516 | 2492 | 1778 | 682 |
| 6 | 63 | 49 | 80 | 319 | 565 | 501 | 902 | 1124 | 1322 | 950 | 405 | 233 | 135 | 82 | 39 | 66 | 116 | 157 | 430 | 1618 | 2552 | 1811 | 668 |
| 7 | 61 | 49 | 86 | 327 | 590 | 513 | 886 | 1127 | 1327 | 932 | 386 | 220 | 132 | 77 | 38 | 69 | 121 | 160 | 378 | 1608 | 2678 | 1885 | 656 |
| 8 | 60 | 50 | 92 | 332 | 617 | 526 | 860 | 1126 | 1321 | 925 | 369 | 208 | 131 | 72 | 37 | 74 | 119 | 166 | 349 | 1593 | 2770 | 1972 | 617 |
| 9 | 59 | 50 | 98 | 336 | 636 | 533 | 834 | 1122 | 1302 | 922 | 353 | 196 | 126 | 70 | 36 | 79 | 122 | 187 | 383 | 1602 | 2816 | 2197 | 595 |
| 10 | 58 | 49 | 103 | 342 | 643 | 530 | 816 | 1118 | 1276 | 916 | 339 | 186 | 123 | 68 | 36 | 76 | 124 | 223 | 413 | 1671 | 2917 | 2172 | 576 |
| 11 | 57 | 49 | 108 | 349 | 638 | 520 | 813 | 1114 | 1252 | 902 | 329 | 178 | 119 | 66 | 38 | 74 | 129 | 267 | 410 | 1650 | 2934 | 1866 | 555 |
| 12 | 57 | 49 | 112 | 358 | 626 | 511 | 830 | 1105 | 1231 | 880 | 324 | 172 | 117 | 64 | 40 | 77 | 141 | 300 | 476 | 1625 | 2839 | 1673 | 532 |
| 13 | 57 | 49 | 116 | 372 | 617 | 513 | 857 | 1096 | 1211 | 851 | 320 | 166 | 114 | 62 | 40 | 79 | 142 | 305 | 529 | 1570 | 2667 | 1625 | 510 |
| 14 | 56 | 50 | 122 | 390 | 615 | 525 | 882 | 1092 | 1193 | 818 | 317 | 160 | 112 | 61 | 38 | 80 | 137 | 293 | 604 | 1530 | 2534 | 1596 | 484 |
| 15 | 56 | 53 | 132 | 408 | 622 | 548 | 897 | 1097 | 1184 | 791 | 314 | 154 | 111 | 63 | 35 | 80 | 135 | 268 | 712 | 1570 | 2370 | 1527 | 467 |
| 16 | 55 | 58 | 146 | 423 | 638 | 586 | 906 | 1115 | 1190 | 789 | 309 | 148 | 113 | 64 | 35 | 80 | 143 | 326 | 800 | 1634 | 2274 | 1434 | 442 |
| 17 | 56 | 69 | 162 | 432 | 650 | 642 | 919 | 1149 | 1210 | 821 | 303 | 142 | 113 | 65 | 39 | 90 | 147 | 316 | 846 | 1655 | 2159 | 1423 | 423 |
| 18 | 63 | 86 | 176 | 433 | 654 | 707 | 934 | 1198 | 1238 | 865 | 297 | 136 | 116 | 71 | 41 | 111 | 145 | 316 | 906 | 1689 | 2254 | 1434 | 409 |
| 19 | 81 | 107 | 186 | 427 | 650 | 773 | 956 | 1246 | 1273 | 897 | 293 | 130 | 122 | 76 | 41 | 116 | 151 | 316 | 959 | 1684 | 2460 | 1421 | 394 |
| 20 | 105 | 129 | 190 | 415 | 640 | 835 | 994 | 1286 | 1313 | 906 | 292 | 124 | 128 | 80 | 42 | 130 | 135 | 315 | 918 | 1720 | 2561 | 1385 | 384 |
| 21 | 128 | 144 | 189 | 396 | 629 | 887 | 1045 | 1325 | 1355 | 892 | 293 | 119 | 128 | 79 | 43 | 123 | 142 | 316 | 858 | 1878 | 2523 | 1357 | 378 |
| 22 | 145 | 152 | 187 | 375 | 619 | 926 | 1095 | 1366 | 1389 | 863 | 296 | 114 | 126 | 79 | 47 | 123 | 179 | 330 | 799 | 1974 | 2443 | 1278 | 377 |
| 23 | 153 | 151 | 185 | 363 | 605 | 951 | 1129 | 1400 | 1401 | 829 | 302 | 109 | 125 | 76 | 58 | 145 | 221 | 363 | 780 | 2079 | 2412 | 1168 | 370 |
| 24 | 151 | 143 | 185 | 374 | 590 | 960 | 1142 | 1420 | 1392 | 793 | 308 | 105 | 125 | 72 | 63 | 162 | 220 | 469 | 806 | 2125 | 2392 | 1095 | 367 |
| 25 | 142 | 131 | 186 | 414 | 577 | 950 | 1142 | 1432 | 1369 | 758 | 312 | 101 | 120 | 69 | 59 | 174 | 188 | 454 | 823 | 2073 | 2381 | 1020 | 352 |
| 26 | 128 | 118 | 185 | 475 | 565 | 923 | 1134 | 1437 | 1338 | 721 | 310 | 98 | 112 | 63 | 56 | 237 | 171 | 436 | 913 | 2168 | 2295 | 964 | 338 |
| 27 | 114 | 105 | 184 | 540 | 551 | 883 | 1122 | 1430 | 1303 | 685 | 302 | 96 | 107 | 59 | 55 | 254 | 168 | 402 | 947 | 2302 | 2095 | 906 | 323 |
| 28 | 99 | 93 | 186 | 588 | 535 | 842 | 1112 | 1415 | 1265 | 651 | 290 | 94 | 100 | 56 | 65 | 261 | 170 | 363 | 1007 | 2365 | 2096 | 861 | 304 |
| 29 | 87 | 42 | 190 | 607 | 518 | 811 | 1103 | 1400 | 1224 | 618 | 277 | 92 | 96 | 16 | 70 | 246 | 161 | 338 | 1091 | 2375 | 2135 | 826 | 292 |
| 30 | 76 | | 196 | 599 | 501 | 799 | 1096 | 1387 | 1177 | 586 | 266 | 91 | 91 | | 67 | 213 | 151 | 352 | 1116 | 2289 | 2050 | 791 | 288 |
| 31 | 68 | | 203 | | 484 | | 1092 | 1375 | | 553 | | 89 | 90 | | 66 | | 166 | | 1026 | 2285 | | 766 | |

Annexe 4 : Débits moyens journaliers sur la première période de validation 2017-2020 (m³/s)

| Mois | Débit calculé | | | | | | | | | | | | Débit observé | | | | | | | | | | | |
|------|---------------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|---------------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|
| | Janv | Févr | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept | Oct | Nov | Déc | Janv | Févr | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept | Oct | Nov | Déc |
| 1 | 40 | 37 | 68 | 163 | 217 | 290 | 369 | 436 | 920 | 783 | 438 | 134 | 82 | 64 | 41 | 20 | 87 | 183 | 482 | 854 | 1923 | 1646 | 877 | 271 |
| 2 | 40 | 37 | 64 | 161 | 216 | 297 | 390 | 430 | 934 | 763 | 393 | 130 | 78 | 65 | 42 | 20 | 81 | 185 | 454 | 977 | 1799 | 1693 | 856 | 269 |
| 3 | 41 | 37 | 61 | 157 | 217 | 303 | 408 | 431 | 941 | 735 | 355 | 126 | 80 | 61 | 39 | 21 | 75 | 173 | 449 | 960 | 1754 | 1722 | 859 | 264 |
| 4 | 41 | 38 | 59 | 151 | 221 | 308 | 419 | 438 | 945 | 703 | 324 | 122 | 80 | 57 | 38 | 22 | 74 | 163 | 421 | 915 | 1777 | 1659 | 850 | 253 |
| 5 | 41 | 38 | 58 | 145 | 226 | 327 | 424 | 452 | 957 | 670 | 302 | 117 | 80 | 53 | 38 | 23 | 75 | 148 | 385 | 867 | 1813 | 1559 | 764 | 242 |
| 6 | 40 | 38 | 59 | 140 | 234 | 370 | 426 | 475 | 989 | 643 | 288 | 113 | 76 | 50 | 36 | 27 | 75 | 134 | 365 | 903 | 1846 | 1538 | 722 | 232 |
| 7 | 40 | 38 | 62 | 135 | 244 | 424 | 428 | 500 | 1050 | 629 | 277 | 108 | 76 | 48 | 34 | 27 | 72 | 131 | 353 | 957 | 1757 | 1468 | 660 | 222 |
| 8 | 39 | 38 | 69 | 131 | 251 | 470 | 432 | 524 | 1116 | 631 | 266 | 104 | 78 | 48 | 32 | 26 | 70 | 129 | 371 | 1086 | 1598 | 1359 | 628 | 211 |
| 9 | 38 | 38 | 78 | 128 | 255 | 496 | 439 | 547 | 1174 | 649 | 253 | 100 | 76 | 47 | 33 | 26 | 72 | 132 | 377 | 1187 | 1596 | 1284 | 604 | 213 |
| 10 | 38 | 37 | 91 | 126 | 259 | 504 | 451 | 564 | 1231 | 669 | 239 | 96 | 83 | 44 | 34 | 28 | 78 | 134 | 475 | 1267 | 1650 | 1218 | 576 | 206 |
| 11 | 37 | 36 | 117 | 126 | 264 | 503 | 468 | 576 | 1286 | 680 | 226 | 92 | 84 | 44 | 34 | 28 | 80 | 158 | 462 | 1311 | 1724 | 1193 | 546 | 196 |
| 12 | 35 | 35 | 161 | 128 | 268 | 504 | 492 | 585 | 1330 | 690 | 215 | 89 | 78 | 43 | 32 | 27 | 82 | 180 | 436 | 1350 | 1807 | 1213 | 514 | 189 |
| 13 | 34 | 34 | 210 | 132 | 275 | 505 | 524 | 589 | 1363 | 712 | 205 | 86 | 75 | 43 | 33 | 44 | 86 | 216 | 424 | 1370 | 1827 | 1188 | 487 | 178 |
| 14 | 33 | 33 | 249 | 138 | 282 | 504 | 560 | 586 | 1382 | 743 | 196 | 82 | 71 | 43 | 35 | 51 | 87 | 236 | 501 | 1350 | 1831 | 1121 | 464 | 171 |
| 15 | 32 | 32 | 267 | 144 | 289 | 501 | 604 | 592 | 1377 | 784 | 187 | 80 | 67 | 43 | 36 | 52 | 84 | 250 | 485 | 1288 | 1795 | 1058 | 444 | 163 |
| 16 | 31 | 31 | 268 | 147 | 302 | 499 | 658 | 625 | 1348 | 817 | 179 | 77 | 64 | 41 | 38 | 54 | 82 | 239 | 451 | 1249 | 1759 | 1035 | 429 | 157 |
| 17 | 30 | 33 | 258 | 148 | 315 | 498 | 718 | 685 | 1300 | 839 | 171 | 74 | 62 | 40 | 35 | 67 | 78 | 233 | 440 | 1201 | 1730 | 996 | 414 | 148 |
| 18 | 29 | 36 | 248 | 149 | 324 | 497 | 786 | 760 | 1236 | 864 | 164 | 72 | 66 | 39 | 34 | 72 | 78 | 224 | 443 | 1146 | 1681 | 1027 | 401 | 144 |
| 19 | 28 | 42 | 244 | 151 | 324 | 492 | 837 | 840 | 1162 | 879 | 158 | 70 | 81 | 37 | 39 | 79 | 84 | 215 | 448 | 1133 | 1629 | 1212 | 382 | 140 |
| 20 | 27 | 52 | 243 | 159 | 319 | 481 | 856 | 920 | 1087 | 869 | 152 | 68 | 80 | 36 | 39 | 82 | 86 | 214 | 459 | 1201 | 1577 | 1190 | 368 | 136 |
| 21 | 26 | 63 | 236 | 180 | 317 | 463 | 845 | 983 | 1015 | 836 | 147 | 66 | 79 | 36 | 36 | 91 | 89 | 243 | 462 | 1300 | 1568 | 1078 | 357 | 129 |
| 22 | 26 | 74 | 219 | 204 | 325 | 442 | 809 | 1015 | 948 | 798 | 143 | 64 | 73 | 36 | 33 | 96 | 100 | 286 | 464 | 1331 | 1498 | 1084 | 347 | 126 |
| 23 | 25 | 82 | 198 | 223 | 335 | 418 | 756 | 1020 | 894 | 761 | 142 | 63 | 70 | 35 | 31 | 102 | 104 | 289 | 469 | 1468 | 1503 | 1128 | 336 | 120 |
| 24 | 24 | 87 | 177 | 232 | 338 | 395 | 695 | 1008 | 853 | 728 | 142 | 62 | 69 | 35 | 32 | 95 | 107 | 286 | 455 | 1598 | 1549 | 1125 | 314 | 120 |
| 25 | 24 | 87 | 157 | 235 | 332 | 375 | 636 | 979 | 824 | 698 | 143 | 61 | 62 | 36 | 31 | 95 | 108 | 288 | 551 | 1690 | 1557 | 1098 | 303 | 115 |
| 26 | 24 | 84 | 141 | 234 | 316 | 363 | 587 | 940 | 802 | 668 | 143 | 61 | 60 | 36 | 29 | 90 | 112 | 286 | 709 | 1770 | 1596 | 1090 | 290 | 106 |
| 27 | 26 | 79 | 131 | 231 | 300 | 359 | 547 | 901 | 785 | 641 | 143 | 61 | 69 | 36 | 28 | 90 | 118 | 304 | 764 | 1822 | 1559 | 1108 | 278 | 115 |
| 28 | 29 | 73 | 132 | 228 | 290 | 357 | 516 | 875 | 778 | 612 | 142 | 61 | 70 | 38 | 25 | 98 | 146 | 305 | 777 | 1934 | 1553 | 1047 | 266 | 108 |
| 29 | 33 | | 140 | 224 | 285 | 352 | 490 | 865 | 783 | 576 | 140 | 63 | 68 | | 23 | 95 | 163 | 353 | 750 | 1990 | 1528 | 945 | 277 | 109 |
| 30 | 35 | | 151 | 220 | 283 | 354 | 468 | 876 | 789 | 534 | 138 | 64 | 63 | | 21 | 88 | 171 | 478 | 780 | 2073 | 1587 | 910 | 283 | 105 |
| 31 | 37 | | 160 | | 284 | | 450 | 899 | | 486 | | 65 | 62 | | 20 | | 185 | | 786 | 2079 | | 902 | | 36 |

Annexe 5: Débits simulés par le modèle RCA4 avec la carte d'occupation du sol 2034 (2021-2060) à la station de Sorotona (m³/s)

| | Débit simulé 2021-2060 (RCP4.5) | | | | | | | | | | | Débit simulé 2021-2060 (RCP8.5) | | | | | | | | | | | | |
|-----------|---------------------------------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|---------------------------------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|
| | janv | févr | mars | avr | mai | juin | juil | août | sept | oct | nov | décembre | janv | févr | mars | avr | mai | juin | juil | août | sept | oct | nov | déc |
| 1 | 44 | 15 | 118 | 71 | 129 | 148 | 250 | 395 | 293 | 132 | 36 | 36 | 8 | 5 | 9 | 39 | 90 | 122 | 289 | 559 | 341 | 97 | 31 | 15 |
| 2 | 43 | 15 | 110 | 72 | 131 | 151 | 258 | 402 | 290 | 130 | 35 | 34 | 8 | 5 | 10 | 39 | 90 | 123 | 301 | 565 | 329 | 93 | 31 | 14 |
| 3 | 41 | 15 | 105 | 73 | 132 | 159 | 264 | 403 | 289 | 126 | 35 | 32 | 8 | 5 | 10 | 39 | 90 | 125 | 313 | 571 | 316 | 90 | 30 | 14 |
| 4 | 37 | 16 | 101 | 73 | 131 | 171 | 270 | 397 | 288 | 120 | 34 | 30 | 7 | 5 | 11 | 40 | 90 | 126 | 325 | 576 | 303 | 88 | 29 | 14 |
| 5 | 34 | 17 | 98 | 73 | 128 | 182 | 279 | 388 | 287 | 114 | 34 | 27 | 7 | 5 | 11 | 41 | 91 | 128 | 335 | 580 | 291 | 87 | 28 | 14 |
| 6 | 31 | 19 | 94 | 72 | 126 | 193 | 287 | 377 | 284 | 107 | 33 | 25 | 7 | 5 | 12 | 42 | 92 | 130 | 345 | 582 | 279 | 85 | 27 | 13 |
| 7 | 29 | 20 | 90 | 73 | 126 | 208 | 294 | 367 | 279 | 100 | 33 | 23 | 7 | 5 | 13 | 43 | 94 | 133 | 354 | 581 | 269 | 82 | 26 | 13 |
| 8 | 29 | 23 | 86 | 75 | 127 | 224 | 300 | 360 | 276 | 93 | 33 | 22 | 7 | 5 | 13 | 44 | 97 | 135 | 361 | 579 | 260 | 79 | 26 | 13 |
| 9 | 32 | 25 | 83 | 76 | 128 | 235 | 302 | 362 | 273 | 88 | 33 | 22 | 7 | 5 | 14 | 45 | 100 | 138 | 367 | 576 | 253 | 75 | 25 | 12 |
| 10 | 36 | 28 | 80 | 77 | 131 | 240 | 302 | 368 | 268 | 82 | 32 | 28 | 7 | 5 | 14 | 47 | 102 | 141 | 373 | 572 | 245 | 72 | 24 | 12 |
| 11 | 40 | 30 | 77 | 77 | 137 | 242 | 300 | 375 | 261 | 77 | 32 | 35 | 7 | 5 | 15 | 48 | 104 | 144 | 380 | 568 | 237 | 68 | 24 | 12 |
| 12 | 43 | 31 | 76 | 78 | 144 | 242 | 296 | 383 | 252 | 72 | 32 | 41 | 6 | 5 | 16 | 49 | 104 | 148 | 387 | 563 | 229 | 65 | 23 | 12 |
| 13 | 44 | 31 | 76 | 79 | 148 | 240 | 293 | 393 | 243 | 68 | 32 | 45 | 6 | 5 | 16 | 49 | 105 | 153 | 394 | 559 | 221 | 62 | 23 | 12 |
| 14 | 42 | 31 | 77 | 84 | 150 | 237 | 290 | 404 | 232 | 64 | 32 | 49 | 6 | 5 | 17 | 50 | 106 | 157 | 402 | 554 | 214 | 59 | 22 | 11 |
| 15 | 40 | 30 | 77 | 89 | 153 | 232 | 290 | 415 | 223 | 60 | 32 | 59 | 6 | 6 | 19 | 51 | 109 | 162 | 412 | 547 | 206 | 57 | 21 | 11 |
| 16 | 36 | 30 | 77 | 93 | 156 | 227 | 291 | 425 | 216 | 58 | 32 | 80 | 6 | 6 | 20 | 52 | 111 | 166 | 423 | 540 | 197 | 55 | 21 | 11 |
| 17 | 33 | 30 | 76 | 95 | 157 | 222 | 294 | 431 | 211 | 56 | 32 | 103 | 6 | 6 | 21 | 53 | 113 | 170 | 433 | 532 | 189 | 52 | 20 | 11 |
| 18 | 29 | 31 | 77 | 95 | 158 | 218 | 300 | 429 | 206 | 55 | 32 | 114 | 6 | 6 | 22 | 55 | 113 | 173 | 443 | 522 | 181 | 50 | 20 | 10 |
| 19 | 27 | 58 | 78 | 94 | 159 | 214 | 311 | 420 | 200 | 53 | 32 | 113 | 6 | 6 | 23 | 57 | 113 | 177 | 451 | 512 | 173 | 49 | 19 | 10 |
| 20 | 24 | 165 | 79 | 93 | 160 | 210 | 324 | 406 | 194 | 52 | 32 | 104 | 6 | 7 | 23 | 58 | 112 | 182 | 458 | 499 | 165 | 47 | 19 | 10 |
| 21 | 22 | 261 | 81 | 93 | 160 | 205 | 336 | 392 | 187 | 50 | 32 | 93 | 5 | 7 | 24 | 61 | 111 | 187 | 464 | 486 | 158 | 45 | 18 | 10 |
| 22 | 21 | 289 | 80 | 95 | 158 | 201 | 347 | 381 | 179 | 48 | 31 | 80 | 5 | 7 | 25 | 63 | 110 | 194 | 469 | 472 | 150 | 44 | 18 | 10 |
| 23 | 19 | 272 | 78 | 97 | 155 | 200 | 358 | 376 | 170 | 47 | 31 | 68 | 5 | 8 | 26 | 67 | 111 | 203 | 475 | 459 | 143 | 42 | 18 | 9 |
| 24 | 18 | 241 | 76 | 98 | 153 | 203 | 365 | 377 | 161 | 46 | 31 | 57 | 5 | 8 | 26 | 71 | 112 | 213 | 482 | 445 | 136 | 41 | 17 | 9 |
| 25 | 17 | 210 | 77 | 98 | 150 | 206 | 368 | 377 | 154 | 44 | 33 | 48 | 5 | 8 | 27 | 75 | 114 | 224 | 489 | 431 | 129 | 39 | 17 | 9 |
| 26 | 16 | 181 | 78 | 99 | 148 | 210 | 368 | 371 | 147 | 43 | 35 | 40 | 5 | 8 | 28 | 79 | 115 | 236 | 499 | 417 | 123 | 38 | 16 | 9 |
| 27 | 15 | 156 | 78 | 105 | 146 | 216 | 366 | 359 | 141 | 42 | 36 | 34 | 5 | 9 | 29 | 83 | 116 | 248 | 511 | 403 | 117 | 37 | 16 | 9 |
| 28 | 15 | 136 | 76 | 113 | 144 | 224 | 365 | 342 | 136 | 40 | 38 | 32 | 5 | 9 | 31 | 85 | 117 | 259 | 523 | 389 | 112 | 35 | 16 | 9 |
| 29 | 15 | 128 | 74 | 120 | 145 | 232 | 366 | 326 | 133 | 39 | 38 | 34 | 5 | 7 | 34 | 87 | 118 | 269 | 536 | 377 | 106 | 34 | 15 | 8 |
| 30 | 16 | | 72 | 125 | 146 | 241 | 372 | 311 | 133 | 38 | 38 | 39 | 5 | | 37 | 89 | 119 | 279 | 545 | 365 | 102 | 33 | 15 | 8 |
| 31 | 16 | | 71 | | 147 | | 384 | 300 | | 37 | | 43 | 5 | | 38 | | 121 | | 553 | 353 | | 32 | | 8 |

Annexe 6 : Débits simulés par le modèle RCA4 avec la carte d'occupation du sol 2054 (2021-2060) à la station de Sorotona (m³/s)

| Jour | Débit simulé 2021-2060 (RCP4.5) | | | | | | | | | | | | Débit simulé 2021-2060 (RCP8.5) | | | | | | | | | | | |
|------|---------------------------------|------|------|-------|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|---------------------------------|------|------|-------|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|
| | janv | févr | mars | avril | mai | juin | juil | août | sept | oct | nov | déc | janv | févr | mars | avril | mai | juin | juil | août | sept | oct | nov | déc |
| 1 | 8 | 5 | 10 | 40 | 93 | 127 | 302 | 578 | 353 | 99 | 32 | 15 | 45 | 16 | 122 | 74 | 133 | 153 | 258 | 408 | 304 | 137 | 37 | 37 |
| 2 | 8 | 5 | 10 | 40 | 94 | 129 | 314 | 584 | 340 | 95 | 31 | 15 | 45 | 16 | 114 | 75 | 136 | 156 | 267 | 415 | 301 | 135 | 36 | 35 |
| 3 | 8 | 5 | 10 | 41 | 94 | 130 | 326 | 589 | 327 | 92 | 30 | 14 | 42 | 16 | 109 | 76 | 137 | 164 | 273 | 415 | 300 | 130 | 36 | 33 |
| 4 | 8 | 5 | 11 | 41 | 94 | 132 | 338 | 594 | 313 | 90 | 29 | 14 | 39 | 17 | 105 | 76 | 136 | 176 | 279 | 410 | 299 | 124 | 35 | 31 |
| 5 | 7 | 5 | 12 | 42 | 94 | 134 | 349 | 599 | 301 | 88 | 28 | 14 | 35 | 18 | 101 | 76 | 133 | 188 | 287 | 401 | 297 | 117 | 35 | 28 |
| 6 | 7 | 5 | 12 | 43 | 96 | 136 | 359 | 601 | 289 | 86 | 28 | 13 | 32 | 19 | 98 | 76 | 131 | 199 | 296 | 390 | 294 | 110 | 34 | 26 |
| 7 | 7 | 5 | 13 | 44 | 98 | 138 | 368 | 600 | 278 | 84 | 27 | 13 | 30 | 21 | 94 | 76 | 131 | 215 | 303 | 379 | 289 | 103 | 34 | 24 |
| 8 | 7 | 5 | 14 | 46 | 101 | 141 | 375 | 598 | 269 | 80 | 26 | 13 | 30 | 23 | 90 | 78 | 132 | 231 | 309 | 373 | 286 | 96 | 34 | 22 |
| 9 | 7 | 5 | 14 | 47 | 104 | 144 | 382 | 595 | 261 | 77 | 25 | 13 | 33 | 26 | 86 | 80 | 133 | 243 | 312 | 374 | 282 | 90 | 33 | 23 |
| 10 | 7 | 5 | 15 | 49 | 107 | 147 | 388 | 591 | 253 | 73 | 25 | 12 | 37 | 28 | 83 | 80 | 137 | 248 | 312 | 380 | 277 | 84 | 33 | 28 |
| 11 | 7 | 5 | 15 | 50 | 108 | 150 | 395 | 587 | 245 | 70 | 24 | 12 | 41 | 30 | 80 | 81 | 143 | 249 | 310 | 387 | 270 | 79 | 33 | 35 |
| 12 | 7 | 5 | 16 | 51 | 109 | 154 | 402 | 583 | 236 | 66 | 24 | 12 | 44 | 32 | 79 | 81 | 149 | 249 | 306 | 395 | 261 | 74 | 32 | 42 |
| 13 | 6 | 5 | 17 | 51 | 109 | 160 | 409 | 578 | 228 | 63 | 23 | 12 | 45 | 32 | 79 | 82 | 153 | 248 | 302 | 405 | 251 | 69 | 33 | 46 |
| 14 | 6 | 6 | 18 | 52 | 111 | 165 | 418 | 573 | 220 | 60 | 22 | 11 | 43 | 32 | 80 | 87 | 156 | 245 | 300 | 416 | 240 | 65 | 33 | 50 |
| 15 | 6 | 6 | 19 | 53 | 114 | 169 | 427 | 566 | 212 | 58 | 22 | 11 | 40 | 31 | 81 | 92 | 159 | 240 | 300 | 427 | 231 | 62 | 33 | 60 |
| 16 | 6 | 6 | 20 | 54 | 116 | 174 | 438 | 558 | 203 | 55 | 21 | 11 | 37 | 30 | 80 | 96 | 162 | 235 | 301 | 438 | 224 | 60 | 33 | 82 |
| 17 | 6 | 6 | 21 | 56 | 118 | 178 | 449 | 550 | 194 | 53 | 21 | 11 | 33 | 30 | 80 | 98 | 163 | 230 | 304 | 444 | 218 | 58 | 33 | 105 |
| 18 | 6 | 6 | 22 | 57 | 118 | 182 | 459 | 541 | 186 | 51 | 20 | 11 | 30 | 32 | 80 | 99 | 163 | 226 | 310 | 442 | 213 | 56 | 33 | 116 |
| 19 | 6 | 7 | 23 | 59 | 117 | 186 | 467 | 530 | 178 | 49 | 20 | 10 | 27 | 59 | 81 | 98 | 165 | 222 | 321 | 434 | 207 | 55 | 33 | 115 |
| 20 | 6 | 7 | 24 | 61 | 117 | 190 | 474 | 517 | 170 | 48 | 19 | 10 | 25 | 166 | 83 | 96 | 166 | 218 | 335 | 420 | 201 | 53 | 33 | 107 |
| 21 | 6 | 7 | 25 | 63 | 116 | 196 | 480 | 503 | 162 | 46 | 19 | 10 | 23 | 263 | 84 | 96 | 165 | 213 | 347 | 406 | 194 | 51 | 32 | 95 |
| 22 | 5 | 7 | 26 | 66 | 115 | 203 | 486 | 489 | 154 | 44 | 18 | 10 | 21 | 291 | 83 | 99 | 163 | 209 | 359 | 394 | 185 | 50 | 32 | 82 |
| 23 | 5 | 8 | 26 | 70 | 115 | 212 | 492 | 475 | 146 | 43 | 18 | 10 | 20 | 275 | 81 | 101 | 161 | 208 | 369 | 390 | 176 | 48 | 32 | 70 |
| 24 | 5 | 8 | 27 | 74 | 117 | 223 | 499 | 461 | 139 | 41 | 17 | 9 | 19 | 244 | 80 | 102 | 158 | 210 | 377 | 391 | 167 | 47 | 32 | 59 |
| 25 | 5 | 8 | 28 | 79 | 119 | 235 | 506 | 446 | 132 | 40 | 17 | 9 | 17 | 213 | 80 | 102 | 155 | 214 | 380 | 390 | 159 | 45 | 34 | 50 |
| 26 | 5 | 9 | 29 | 83 | 120 | 247 | 516 | 431 | 126 | 38 | 17 | 9 | 17 | 184 | 81 | 103 | 153 | 217 | 380 | 384 | 152 | 44 | 35 | 42 |
| 27 | 5 | 9 | 30 | 86 | 121 | 259 | 528 | 417 | 119 | 37 | 16 | 9 | 16 | 159 | 81 | 109 | 151 | 224 | 379 | 372 | 146 | 43 | 37 | 36 |
| 28 | 5 | 9 | 32 | 89 | 122 | 271 | 541 | 403 | 114 | 36 | 16 | 9 | 16 | 140 | 80 | 117 | 149 | 232 | 377 | 355 | 140 | 41 | 39 | 33 |
| 29 | 5 | 7 | 35 | 91 | 123 | 281 | 553 | 390 | 108 | 35 | 16 | 9 | 16 | 132 | 77 | 124 | 150 | 240 | 378 | 338 | 138 | 40 | 39 | 36 |
| 30 | 5 | | 38 | 93 | 125 | 291 | 563 | 377 | 104 | 34 | 15 | 8 | 16 | | 76 | 129 | 151 | 249 | 384 | 323 | 137 | 39 | 39 | 41 |
| 31 | 5 | | 39 | | 126 | | 571 | 365 | | 33 | | 8 | 16 | | 74 | | 152 | | 396 | 311 | | 38 | | 44 |

Annexe 7 : Débits simulés par le modèle REMO2009 avec la carte d'occupation du sol 2034 (2021-2060) à la station de Sorotona (m³/s)

| | Débit simulé 2021-2060 (RCP4.5) | | | | | | | | | | | | Débit simulé 2021-2060 (RCP8.5) | | | | | | | | | | | |
|-----------|---------------------------------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|---------------------------------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|
| | Janv | Févr | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept | Oct | Nov | Déc | Janv | Févr | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept | Oct | Nov | Déc |
| 1 | 27 | 12 | 13 | 30 | 127 | 272 | 413 | 823 | 983 | 772 | 172 | 43 | 20 | 11 | 8 | 17 | 82 | 247 | 489 | 865 | 1117 | 928 | 197 | 40 |
| 2 | 29 | 12 | 13 | 31 | 128 | 275 | 426 | 818 | 958 | 746 | 158 | 41 | 20 | 11 | 8 | 18 | 135 | 259 | 498 | 906 | 1147 | 915 | 182 | 39 |
| 3 | 31 | 11 | 15 | 31 | 125 | 277 | 441 | 815 | 928 | 718 | 146 | 39 | 19 | 10 | 8 | 18 | 180 | 275 | 514 | 939 | 1165 | 896 | 169 | 38 |
| 4 | 32 | 11 | 16 | 31 | 121 | 282 | 455 | 812 | 896 | 687 | 135 | 38 | 19 | 10 | 8 | 19 | 203 | 292 | 536 | 981 | 1173 | 875 | 156 | 37 |
| 5 | 33 | 11 | 18 | 31 | 119 | 288 | 469 | 811 | 864 | 655 | 124 | 38 | 19 | 10 | 8 | 20 | 208 | 308 | 562 | 1067 | 1176 | 851 | 144 | 36 |
| 6 | 33 | 11 | 18 | 31 | 116 | 294 | 493 | 823 | 832 | 625 | 115 | 38 | 18 | 10 | 8 | 21 | 203 | 325 | 601 | 1159 | 1180 | 825 | 132 | 35 |
| 7 | 32 | 11 | 19 | 32 | 112 | 299 | 536 | 834 | 827 | 599 | 106 | 39 | 18 | 10 | 8 | 21 | 192 | 342 | 639 | 1212 | 1181 | 797 | 121 | 34 |
| 8 | 31 | 11 | 19 | 32 | 109 | 302 | 571 | 840 | 870 | 577 | 98 | 40 | 18 | 9 | 9 | 21 | 178 | 359 | 672 | 1227 | 1173 | 764 | 112 | 34 |
| 9 | 29 | 11 | 19 | 34 | 105 | 304 | 587 | 868 | 934 | 559 | 91 | 41 | 17 | 9 | 9 | 21 | 164 | 376 | 705 | 1228 | 1155 | 729 | 104 | 33 |
| 10 | 28 | 12 | 19 | 37 | 102 | 305 | 593 | 904 | 963 | 541 | 85 | 42 | 17 | 9 | 10 | 21 | 151 | 393 | 736 | 1212 | 1135 | 694 | 96 | 32 |
| 11 | 26 | 12 | 18 | 40 | 100 | 308 | 594 | 920 | 954 | 523 | 79 | 42 | 17 | 9 | 10 | 21 | 141 | 410 | 765 | 1174 | 1131 | 660 | 90 | 31 |
| 12 | 25 | 12 | 18 | 42 | 99 | 313 | 606 | 924 | 932 | 504 | 74 | 43 | 16 | 9 | 10 | 22 | 134 | 432 | 788 | 1125 | 1128 | 631 | 84 | 31 |
| 13 | 25 | 12 | 19 | 43 | 100 | 320 | 636 | 926 | 909 | 483 | 70 | 45 | 16 | 9 | 11 | 23 | 130 | 455 | 804 | 1080 | 1116 | 605 | 79 | 30 |
| 14 | 24 | 11 | 19 | 45 | 101 | 328 | 657 | 931 | 887 | 463 | 66 | 47 | 16 | 9 | 11 | 24 | 128 | 474 | 813 | 1045 | 1103 | 580 | 75 | 29 |
| 15 | 23 | 11 | 20 | 46 | 103 | 337 | 672 | 950 | 872 | 451 | 63 | 48 | 15 | 8 | 12 | 25 | 127 | 482 | 817 | 1017 | 1088 | 555 | 71 | 29 |
| 16 | 22 | 10 | 20 | 48 | 105 | 347 | 704 | 977 | 872 | 457 | 60 | 50 | 15 | 8 | 13 | 26 | 127 | 481 | 820 | 993 | 1069 | 532 | 67 | 28 |
| 17 | 21 | 10 | 21 | 49 | 107 | 357 | 768 | 1008 | 882 | 455 | 57 | 50 | 15 | 8 | 13 | 28 | 131 | 472 | 822 | 970 | 1046 | 508 | 64 | 28 |
| 18 | 20 | 10 | 22 | 50 | 107 | 364 | 827 | 1067 | 898 | 436 | 55 | 51 | 14 | 8 | 14 | 29 | 135 | 458 | 820 | 946 | 1018 | 484 | 61 | 27 |
| 19 | 19 | 10 | 22 | 51 | 109 | 369 | 864 | 1151 | 903 | 408 | 54 | 50 | 14 | 8 | 14 | 30 | 140 | 442 | 813 | 922 | 987 | 462 | 59 | 27 |
| 20 | 18 | 9 | 23 | 52 | 111 | 373 | 879 | 1192 | 891 | 381 | 52 | 48 | 14 | 8 | 15 | 31 | 145 | 428 | 801 | 900 | 954 | 439 | 56 | 26 |
| 21 | 17 | 9 | 23 | 53 | 116 | 376 | 881 | 1192 | 884 | 355 | 50 | 46 | 14 | 8 | 15 | 31 | 150 | 419 | 786 | 894 | 921 | 417 | 54 | 25 |
| 22 | 16 | 9 | 23 | 55 | 124 | 378 | 880 | 1178 | 913 | 331 | 48 | 43 | 13 | 8 | 15 | 32 | 157 | 417 | 770 | 914 | 889 | 393 | 52 | 25 |
| 23 | 15 | 10 | 23 | 57 | 135 | 380 | 880 | 1167 | 958 | 310 | 47 | 40 | 13 | 8 | 16 | 32 | 165 | 421 | 757 | 926 | 863 | 370 | 50 | 24 |
| 24 | 14 | 10 | 23 | 59 | 151 | 381 | 880 | 1163 | 970 | 291 | 46 | 37 | 13 | 8 | 16 | 33 | 174 | 429 | 747 | 927 | 845 | 347 | 49 | 24 |
| 25 | 14 | 11 | 24 | 62 | 169 | 383 | 876 | 1149 | 944 | 274 | 46 | 34 | 13 | 8 | 16 | 34 | 184 | 440 | 738 | 929 | 842 | 325 | 47 | 23 |
| 26 | 13 | 11 | 24 | 64 | 188 | 385 | 866 | 1124 | 906 | 257 | 47 | 31 | 12 | 8 | 16 | 36 | 195 | 452 | 729 | 935 | 861 | 304 | 46 | 23 |
| 27 | 13 | 11 | 25 | 68 | 207 | 388 | 851 | 1093 | 874 | 242 | 47 | 29 | 12 | 8 | 17 | 40 | 207 | 462 | 726 | 947 | 881 | 285 | 44 | 23 |
| 28 | 13 | 12 | 26 | 77 | 227 | 392 | 835 | 1062 | 848 | 227 | 46 | 27 | 12 | 8 | 17 | 45 | 219 | 470 | 737 | 967 | 896 | 266 | 43 | 22 |
| 29 | 12 | 14 | 27 | 99 | 244 | 397 | 824 | 1037 | 821 | 213 | 45 | 25 | 12 | 8 | 17 | 50 | 228 | 476 | 773 | 997 | 919 | 247 | 42 | 22 |
| 30 | 12 | | 28 | 119 | 258 | 404 | 826 | 1018 | 796 | 199 | 44 | 25 | 11 | | 17 | 56 | 235 | 482 | 810 | 1037 | 932 | 229 | 41 | 21 |
| 31 | 12 | | 29 | | 267 | | 828 | 1001 | | 185 | | 26 | 11 | | 17 | | 240 | | 838 | 1079 | | 212 | | 21 |

Annexe 8 : Débits simulés par le modèle REMO2009 avec la carte d'occupation du sol 2054 (2021-2060) à la station de Sorotona

| | Débit simulé 2021-2060 (RCP4.5) | | | | | | | | | | | | Débit simulé 2021-2060 (RCP8.5) | | | | | | | | | | | |
|-----------|---------------------------------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|---------------------------------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|
| | Janv | Févr | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept | Oct | Nov | Déc | Janv | Févr | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept | Oct | Nov | Déc |
| 1 | 27 | 12 | 13 | 32 | 143 | 297 | 447 | 898 | 1053 | 834 | 184 | 44 | 20 | 11 | 8 | 18 | 84 | 256 | 507 | 891 | 1149 | 957 | 203 | 40 |
| 2 | 30 | 12 | 14 | 33 | 142 | 300 | 460 | 891 | 1027 | 803 | 170 | 42 | 20 | 11 | 8 | 18 | 138 | 268 | 516 | 932 | 1178 | 943 | 188 | 39 |
| 3 | 32 | 12 | 15 | 33 | 138 | 302 | 476 | 888 | 996 | 771 | 156 | 40 | 19 | 11 | 8 | 19 | 184 | 285 | 533 | 966 | 1196 | 924 | 173 | 38 |
| 4 | 33 | 11 | 17 | 34 | 133 | 307 | 491 | 887 | 961 | 738 | 144 | 39 | 19 | 10 | 8 | 20 | 207 | 302 | 555 | 1009 | 1204 | 902 | 160 | 37 |
| 5 | 34 | 11 | 18 | 34 | 129 | 313 | 506 | 886 | 926 | 703 | 133 | 39 | 19 | 10 | 8 | 20 | 212 | 319 | 581 | 1095 | 1207 | 878 | 147 | 36 |
| 6 | 34 | 11 | 19 | 34 | 126 | 321 | 529 | 898 | 894 | 671 | 122 | 39 | 18 | 10 | 8 | 21 | 207 | 336 | 621 | 1188 | 1210 | 851 | 135 | 35 |
| 7 | 33 | 11 | 20 | 34 | 122 | 326 | 578 | 910 | 887 | 643 | 113 | 40 | 18 | 10 | 8 | 21 | 195 | 354 | 662 | 1242 | 1211 | 822 | 124 | 34 |
| 8 | 32 | 11 | 20 | 35 | 119 | 328 | 621 | 915 | 932 | 620 | 104 | 41 | 18 | 10 | 9 | 22 | 181 | 372 | 696 | 1257 | 1204 | 789 | 115 | 34 |
| 9 | 30 | 12 | 20 | 36 | 115 | 330 | 641 | 945 | 1009 | 600 | 96 | 42 | 17 | 9 | 9 | 22 | 168 | 390 | 728 | 1258 | 1186 | 753 | 106 | 33 |
| 10 | 28 | 12 | 20 | 39 | 112 | 332 | 647 | 990 | 1048 | 582 | 89 | 43 | 17 | 9 | 10 | 22 | 155 | 407 | 760 | 1243 | 1167 | 717 | 98 | 32 |
| 11 | 27 | 12 | 19 | 42 | 110 | 334 | 649 | 1010 | 1041 | 563 | 82 | 43 | 17 | 9 | 10 | 22 | 145 | 425 | 789 | 1204 | 1165 | 683 | 92 | 31 |
| 12 | 26 | 12 | 19 | 44 | 109 | 340 | 658 | 1015 | 1016 | 543 | 77 | 44 | 16 | 9 | 11 | 23 | 139 | 447 | 812 | 1154 | 1162 | 652 | 86 | 31 |
| 13 | 25 | 12 | 20 | 46 | 109 | 347 | 692 | 1018 | 987 | 522 | 72 | 46 | 16 | 9 | 11 | 24 | 135 | 471 | 828 | 1108 | 1150 | 625 | 80 | 30 |
| 14 | 24 | 11 | 20 | 47 | 110 | 356 | 717 | 1022 | 960 | 500 | 68 | 48 | 16 | 9 | 11 | 25 | 132 | 490 | 837 | 1073 | 1136 | 600 | 76 | 30 |
| 15 | 24 | 11 | 21 | 49 | 112 | 366 | 733 | 1046 | 940 | 486 | 64 | 49 | 15 | 8 | 12 | 26 | 131 | 499 | 841 | 1045 | 1120 | 575 | 72 | 29 |
| 16 | 23 | 11 | 21 | 51 | 115 | 377 | 763 | 1077 | 938 | 496 | 61 | 51 | 15 | 8 | 13 | 27 | 132 | 498 | 844 | 1021 | 1100 | 550 | 68 | 28 |
| 17 | 22 | 10 | 22 | 53 | 116 | 388 | 833 | 1110 | 950 | 498 | 59 | 52 | 15 | 8 | 13 | 29 | 136 | 489 | 846 | 997 | 1076 | 526 | 65 | 28 |
| 18 | 21 | 10 | 23 | 54 | 117 | 396 | 902 | 1166 | 970 | 477 | 57 | 52 | 14 | 8 | 14 | 30 | 140 | 474 | 845 | 973 | 1048 | 502 | 62 | 27 |
| 19 | 20 | 10 | 24 | 55 | 118 | 401 | 945 | 1254 | 978 | 446 | 55 | 51 | 14 | 8 | 15 | 31 | 146 | 458 | 839 | 949 | 1017 | 478 | 59 | 27 |
| 20 | 18 | 10 | 24 | 56 | 121 | 404 | 961 | 1299 | 965 | 414 | 53 | 50 | 14 | 8 | 15 | 32 | 150 | 444 | 826 | 927 | 983 | 455 | 57 | 26 |
| 21 | 17 | 10 | 25 | 57 | 126 | 408 | 959 | 1301 | 952 | 384 | 51 | 47 | 14 | 8 | 15 | 32 | 156 | 435 | 811 | 921 | 949 | 432 | 55 | 26 |
| 22 | 16 | 10 | 25 | 59 | 134 | 410 | 953 | 1291 | 978 | 358 | 50 | 45 | 13 | 8 | 16 | 33 | 163 | 433 | 794 | 942 | 917 | 408 | 53 | 25 |
| 23 | 16 | 10 | 25 | 61 | 146 | 412 | 949 | 1282 | 1034 | 334 | 48 | 42 | 13 | 8 | 16 | 33 | 171 | 437 | 781 | 955 | 890 | 383 | 51 | 25 |
| 24 | 15 | 10 | 25 | 63 | 163 | 414 | 945 | 1277 | 1053 | 313 | 47 | 38 | 13 | 8 | 16 | 34 | 180 | 445 | 771 | 957 | 871 | 360 | 49 | 24 |
| 25 | 14 | 11 | 25 | 66 | 182 | 416 | 939 | 1257 | 1026 | 294 | 47 | 35 | 13 | 8 | 16 | 35 | 191 | 456 | 761 | 958 | 870 | 337 | 47 | 24 |
| 26 | 14 | 11 | 26 | 69 | 202 | 418 | 927 | 1221 | 983 | 276 | 47 | 32 | 12 | 8 | 17 | 37 | 203 | 468 | 753 | 964 | 889 | 316 | 46 | 23 |
| 27 | 13 | 12 | 26 | 73 | 224 | 421 | 911 | 1180 | 953 | 259 | 47 | 30 | 12 | 8 | 17 | 41 | 215 | 479 | 750 | 975 | 909 | 295 | 45 | 23 |
| 28 | 13 | 12 | 28 | 83 | 246 | 425 | 895 | 1143 | 927 | 243 | 47 | 28 | 12 | 8 | 18 | 46 | 227 | 487 | 762 | 994 | 924 | 275 | 43 | 22 |
| 29 | 13 | 14 | 29 | 108 | 265 | 430 | 885 | 1112 | 896 | 228 | 46 | 26 | 12 | 9 | 18 | 52 | 237 | 493 | 798 | 1025 | 948 | 256 | 42 | 22 |
| 30 | 12 | | 30 | 133 | 280 | 437 | 894 | 1090 | 865 | 213 | 45 | 25 | 11 | | 18 | 58 | 244 | 499 | 836 | 1066 | 961 | 237 | 41 | 21 |
| 31 | 12 | | 31 | | 291 | | 902 | 1073 | | 198 | | 26 | 11 | | 18 | | 249 | | 864 | 1109 | | 219 | | 21 |

Annexe 9 : Débits simulés par le modèle RACMO22T avec la carte d'occupation du sol 2054 (2021-2060) à la station de Sorotona (m³/s)

| | Débit simulé 2021-2060 (RCP4.5) | | | | | | | | | | | | Débit simulé 2021-2060 (RCP8.5) | | | | | | | | | | | |
|-----------|---------------------------------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|---------------------------------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|
| | Janv | Févr | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept | Oct | Nov | Déc | Janv | Févr | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept | Oct | Nov | Déc |
| 1 | 27 | 14 | 30 | 57 | 53 | 77 | 110 | 144 | 296 | 173 | 55 | 37 | 51 | 16 | 28 | 42 | 98 | 114 | 147 | 278 | 430 | 290 | 85 | 45 |
| 2 | 28 | 14 | 33 | 58 | 50 | 77 | 119 | 148 | 286 | 167 | 53 | 39 | 47 | 15 | 28 | 42 | 98 | 116 | 152 | 288 | 425 | 282 | 87 | 42 |
| 3 | 30 | 14 | 36 | 57 | 47 | 77 | 125 | 152 | 277 | 159 | 52 | 47 | 44 | 15 | 29 | 43 | 97 | 120 | 155 | 296 | 426 | 272 | 88 | 40 |
| 4 | 32 | 14 | 39 | 56 | 45 | 76 | 127 | 159 | 271 | 153 | 51 | 59 | 40 | 15 | 30 | 43 | 94 | 126 | 158 | 302 | 430 | 260 | 86 | 39 |
| 5 | 33 | 15 | 40 | 55 | 44 | 76 | 129 | 171 | 268 | 151 | 49 | 72 | 36 | 15 | 32 | 43 | 90 | 132 | 164 | 308 | 434 | 247 | 83 | 40 |
| 6 | 33 | 16 | 40 | 56 | 44 | 75 | 130 | 188 | 269 | 150 | 48 | 85 | 33 | 14 | 32 | 44 | 87 | 136 | 170 | 313 | 435 | 235 | 79 | 43 |
| 7 | 33 | 18 | 39 | 57 | 45 | 74 | 130 | 210 | 269 | 148 | 46 | 94 | 32 | 14 | 33 | 46 | 86 | 142 | 174 | 319 | 437 | 225 | 74 | 48 |
| 8 | 33 | 19 | 37 | 59 | 47 | 73 | 129 | 235 | 266 | 144 | 44 | 101 | 35 | 15 | 33 | 49 | 87 | 146 | 177 | 333 | 439 | 218 | 70 | 53 |
| 9 | 33 | 20 | 35 | 62 | 49 | 72 | 127 | 259 | 259 | 139 | 43 | 113 | 48 | 15 | 32 | 52 | 88 | 147 | 177 | 359 | 440 | 212 | 67 | 59 |
| 10 | 35 | 20 | 34 | 63 | 51 | 71 | 123 | 278 | 250 | 132 | 42 | 140 | 85 | 15 | 31 | 53 | 91 | 145 | 176 | 389 | 438 | 205 | 65 | 68 |
| 11 | 37 | 20 | 36 | 64 | 53 | 71 | 119 | 291 | 240 | 125 | 41 | 185 | 127 | 15 | 30 | 54 | 97 | 143 | 174 | 417 | 431 | 197 | 62 | 78 |
| 12 | 39 | 19 | 38 | 64 | 55 | 71 | 113 | 300 | 230 | 119 | 40 | 216 | 149 | 15 | 30 | 55 | 102 | 141 | 171 | 446 | 420 | 187 | 59 | 93 |
| 13 | 40 | 18 | 40 | 63 | 56 | 71 | 107 | 306 | 219 | 115 | 39 | 237 | 148 | 14 | 30 | 57 | 106 | 139 | 169 | 479 | 405 | 178 | 57 | 112 |
| 14 | 40 | 17 | 42 | 62 | 57 | 72 | 101 | 309 | 209 | 111 | 38 | 241 | 136 | 14 | 31 | 61 | 108 | 136 | 169 | 513 | 391 | 170 | 55 | 133 |
| 15 | 39 | 16 | 44 | 61 | 58 | 72 | 97 | 311 | 201 | 107 | 37 | 227 | 119 | 14 | 32 | 66 | 112 | 131 | 170 | 547 | 382 | 162 | 54 | 171 |
| 16 | 37 | 16 | 45 | 62 | 59 | 72 | 95 | 311 | 196 | 102 | 38 | 207 | 103 | 13 | 33 | 70 | 115 | 127 | 172 | 576 | 379 | 155 | 53 | 235 |
| 17 | 35 | 15 | 46 | 65 | 62 | 70 | 95 | 309 | 193 | 99 | 38 | 188 | 90 | 13 | 34 | 72 | 117 | 122 | 172 | 594 | 380 | 148 | 52 | 277 |
| 18 | 33 | 15 | 47 | 67 | 68 | 69 | 96 | 308 | 192 | 97 | 37 | 171 | 78 | 13 | 35 | 73 | 118 | 117 | 175 | 597 | 382 | 142 | 50 | 279 |
| 19 | 30 | 15 | 46 | 69 | 75 | 66 | 98 | 307 | 191 | 97 | 36 | 153 | 68 | 15 | 36 | 74 | 121 | 113 | 181 | 588 | 383 | 137 | 49 | 256 |
| 20 | 29 | 16 | 47 | 69 | 82 | 64 | 102 | 308 | 190 | 98 | 35 | 136 | 59 | 21 | 36 | 74 | 123 | 108 | 188 | 572 | 380 | 134 | 47 | 225 |
| 21 | 27 | 18 | 47 | 70 | 86 | 63 | 109 | 313 | 190 | 98 | 34 | 119 | 52 | 29 | 36 | 75 | 124 | 105 | 196 | 553 | 372 | 132 | 46 | 193 |
| 22 | 25 | 19 | 47 | 71 | 90 | 63 | 116 | 322 | 189 | 97 | 36 | 102 | 45 | 35 | 36 | 78 | 122 | 103 | 206 | 541 | 361 | 129 | 45 | 164 |
| 23 | 24 | 21 | 47 | 72 | 91 | 63 | 120 | 332 | 188 | 95 | 40 | 87 | 39 | 38 | 35 | 80 | 119 | 103 | 217 | 542 | 350 | 126 | 44 | 139 |
| 24 | 22 | 22 | 47 | 72 | 91 | 64 | 121 | 341 | 188 | 91 | 44 | 74 | 33 | 39 | 36 | 80 | 115 | 105 | 227 | 550 | 340 | 121 | 43 | 117 |
| 25 | 21 | 22 | 48 | 71 | 90 | 65 | 121 | 345 | 187 | 86 | 46 | 62 | 28 | 37 | 39 | 79 | 111 | 108 | 233 | 555 | 330 | 115 | 44 | 99 |
| 26 | 19 | 23 | 49 | 70 | 88 | 68 | 121 | 344 | 186 | 80 | 47 | 52 | 24 | 35 | 42 | 81 | 109 | 112 | 237 | 550 | 320 | 108 | 46 | 83 |
| 27 | 18 | 25 | 49 | 67 | 86 | 73 | 122 | 338 | 186 | 74 | 46 | 44 | 21 | 32 | 44 | 85 | 107 | 118 | 240 | 534 | 312 | 100 | 48 | 70 |
| 28 | 17 | 26 | 51 | 64 | 84 | 79 | 126 | 330 | 185 | 69 | 44 | 37 | 19 | 30 | 45 | 91 | 107 | 126 | 243 | 511 | 304 | 93 | 49 | 61 |
| 29 | 16 | 36 | 52 | 61 | 82 | 88 | 132 | 321 | 183 | 65 | 42 | 32 | 18 | 37 | 44 | 95 | 108 | 133 | 247 | 486 | 299 | 87 | 49 | 57 |
| 30 | 15 | | 54 | 57 | 80 | 99 | 138 | 313 | 178 | 61 | 39 | 28 | 17 | | 43 | 97 | 110 | 141 | 255 | 462 | 295 | 83 | 47 | 55 |
| 31 | 14 | | 56 | | 78 | | 141 | 305 | | 57 | | 27 | 16 | | 42 | | 112 | | 266 | 442 | | 83 | | 53 |

Annexe 10 : Volume d'eau mensuel pompé par campagne sur la période 2012-2020 (m³/mois)

| | Octobre | Novembre | Décembre | Janvier | Février | Mars | Avril | Mai | Juin | Juillet | Août | Septembre | Cumul |
|---------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|-----------|------------|
| Campagne 2012-2013 | | | | | | | | | | | | | |
| Station B | 615 | 2 088 335 | 3 375 940 | 3 165 610 | 2 538 720 | 2 080 955 | 1 702 115 | 370 025 | 1 488 915 | 868 380 | 282 080 | 0 | 17 961 690 |
| Station C | 85 822 | 804 318 | 1 093 834 | 1 122 647 | 728 850 | 588 315 | 520 695 | 139 148 | 658 766 | 472 706 | 66 995 | 0 | 6 282 096 |
| Station D | 47 874 | 657 712 | 1 043 782 | 806 182 | 781 336 | 535 098 | 469 549 | 177 053 | 464 600 | 63 024 | 151 803 | 0 | 5 198 013 |
| Usine | 6 038 | 252 883 | 223 355 | 486 895 | 300 220 | 271 607 | 260 800 | 243 570 | 204 325 | 31 043 | 13 505 | 0 | 2 294 241 |
| Campagne 2013-2014 | | | | | | | | | | | | | |
| Station B | 0 | 1 673 415 | 2 318 673 | 2 547 330 | 2 731 420 | 2 638 555 | 1 417 780 | 990 560 | 1 621 781 | 1 301 545 | 324 105 | 0 | 17 565 164 |
| Station C | 0 | 741 845 | 948 968 | 806 933 | 1 084 690 | 1 111 341 | 596 680 | 459 338 | 586 390 | 590 006 | 130 682 | 0 | 7 056 873 |
| Station D | 0 | 571 458 | 763 661 | 703 768 | 814 666 | 1 063 429 | 540 653 | 309 969 | 330 371 | 477 934 | 172 407 | 0 | 5 748 316 |
| Usine | 0 | 56 229 | 188 767 | 190 383 | 214 072 | 235 558 | 225 645 | 183 884 | 148 092 | 16 073 | 6 490 | 0 | 1 465 193 |
| Campagne 2014-2015 | | | | | | | | | | | | | |
| Station B | 59 450 | 2 381 485 | 2 998 535 | 3 039 740 | 1 666 855 | 1 873 290 | 1 603 920 | 1 657 015 | 1 235 330 | 720 575 | 250 715 | 0 | 17 486 910 |
| Station C | 0 | 216 110 | 1 173 256 | 1 070 492 | 681 824 | 780 869 | 750 049 | 578 789 | 535 118 | 345 352 | 92 611 | 0 | 6 224 470 |
| Station D | 45 854 | 754 167 | 978 690 | 1 052 925 | 759 015 | 817 393 | 679 932 | 425 614 | 466 905 | 314 283 | 87 567 | 0 | 6 382 345 |
| Usine | 37 048 | 174 817 | 223 003 | 216 889 | 230 142 | 237 853 | 218 517 | 97 757 | 13 108 | 8 657 | 1 176 | 0 | 1 458 967 |
| Campagne 2015-2016 | | | | | | | | | | | | | |
| Station B | 0 | 1 511 495 | 2 334 143 | 2 110 071 | 2 608 667 | 2 436 922 | 2 155 898 | 1 211 958 | 438 843 | 206 834 | 0 | 0 | 15 014 831 |
| Station C | 126 206 | 816 965 | 1 059 712 | 952 309 | 1 105 444 | 1 007 346 | 1 017 899 | 515 537 | 271 787 | 182 958 | 0 | 0 | 7 056 163 |
| Station D | 137 259 | 612 868 | 884 154 | 842 459 | 810 626 | 915 773 | 753 157 | 369 155 | 243 988 | 163 014 | 0 | 0 | 5 732 453 |
| Usine | 45 493 | 171 649 | 185 443 | 188 389 | 172 351 | 180 367 | 184 094 | 118 516 | 11 846 | 7 156 | 4 833 | 0 | 1 270 137 |
| Campagne 2016-2017 | | | | | | | | | | | | | |
| Station B | 151 934 | 1 677 957 | 2 418 410 | 2 992 580 | 2 597 676 | 2 167 875 | 1 177 110 | 619 715 | 425 785 | 288 845 | 0 | 0 | 14 517 887 |
| Station C | 107 266 | 875 514 | 1 112 975 | 1 111 801 | 1 244 483 | 865 217 | 663 693 | 261 164 | 253 991 | 185 294 | 0 | 0 | 6 681 398 |
| Station D | 120 998 | 691 244 | 1 093 628 | 1 108 071 | 1 029 065 | 754 470 | 516 062 | 197 960 | 190 991 | 171 700 | 0 | 0 | 5 874 188 |
| Usine | 11 044 | 160 666 | 162 406 | 179 671 | 163 768 | 176 604 | 167 335 | 128 195 | 113 617 | 4 907 | 0 | 0 | 1 268 213 |
| Campagne 2017-2018 | | | | | | | | | | | | | |
| Station B | 631 195 | 2 717 685 | 3 367 945 | 3 342 935 | 2 727 525 | 2 747 092 | 2 206 620 | 1 414 500 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19 155 497 |
| Station C | 338 515 | 1 036 096 | 1 153 205 | 1 137 584 | 949 913 | 942 866 | 1 035 561 | 627 865 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 221 605 |
| Station D | 327 644 | 880 316 | 926 574 | 994 749 | 798 607 | 711 343 | 875 708 | 562 267 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 077 208 |
| Usine | 119 245 | 267 040 | 288 649 | 272 590 | 287 535 | 233 430 | 230 264 | 116 028 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 814 781 |
| Campagne 2018-2019 | | | | | | | | | | | | | |
| Station B | 483 390 | 2 419 820 | 2 355 450 | 3 047 940 | 1 978 438 | 2 615 167 | 1 484 405 | 951 815 | 1 448 735 | 356 905 | 0 | 0 | 17 142 065 |
| Station C | 168 209 | 850 262 | 921 649 | 1 119 267 | 924 660 | 992 665 | 529 950 | 371 298 | 551 217 | 161 229 | 0 | 0 | 6 590 406 |
| Station D | 215 837 | 893 648 | 893 446 | 860 114 | 781 724 | 873 922 | 431 503 | 322 610 | 396 627 | 150 894 | 0 | 0 | 5 820 325 |
| Usine | 53 950 | 234 038 | 256 325 | 285 910 | 275 680 | 281 535 | 225 910 | 265 321 | 120 820 | 8 115 | 4 710 | 5 080 | 2 017 394 |
| Campagne 2019-2020 | | | | | | | | | | | | | |
| Station B | 631 195 | 2 717 685 | 3 367 945 | 3 342 935 | 2 727 525 | 2 747 092 | 2 206 620 | 1 414 500 | 1 159 275 | 853 620 | 225 090 | 0 | 21 393 482 |
| Station C | 338 515 | 1 036 096 | 1 153 205 | 1 137 584 | 949 913 | 942 866 | 1 035 561 | 627 865 | 551 200 | 246 803 | 235 924 | 4 017 | 8 259 549 |
| Station D | 327 644 | 880 316 | 926 574 | 994 749 | 798 607 | 711 343 | 875 708 | 562 267 | 523 887 | 302 697 | 146 753 | 0 | 7 050 545 |
| Usine | 215 837 | 893 648 | 893 446 | 860 114 | 781 724 | 873 922 | 431 503 | 322 610 | 176 200 | 18 900 | 16 100 | 9 900 | 5 493 904 |

Annexe 11 : Détermination des besoins en eau d'irrigation des parcelles irriguées selon le modèle RACMO22T sur la période 2024-2060 (m³/mois)

| | Oct | Nov | Déc | Janv | Févr | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 2024-2025 | 3 815 076 | 4 305 513 | 2 011 898 | 4 204 351 | 3 838 794 | 4 711 080 | 1 931 699 | 2 984 858 | 4 354 708 | 2 725 072 | 385 019 | 1 312 016 |
| 2025-2026 | 3 644 587 | 2 853 818 | 936 040 | 3 883 706 | 3 801 768 | 4 254 882 | 3 542 440 | 1 372 626 | 1 357 022 | 17 379 | 1 346 310 | 1 039 304 |
| 2026-2027 | 2 343 999 | 5 491 395 | 4 660 945 | 3 056 498 | 4 400 426 | 3 971 858 | 2 653 903 | 1 993 571 | 1 931 799 | 1 065 632 | 637 288 | 39 889 |
| 2027-2028 | 4 308 522 | 4 474 043 | 4 745 327 | 3 753 003 | 4 276 290 | 4 094 236 | 1 562 779 | 1 828 813 | 1 355 187 | 1 899 230 | 995 087 | 0 |
| 2028-2029 | 3 242 479 | 3 788 562 | 5 039 659 | 2 719 168 | 3 771 469 | 2 390 001 | 3 168 459 | 1 552 056 | 1 150 577 | 545 265 | 958 103 | 188 356 |
| 2029-2030 | 2 580 178 | 5 172 489 | 3 655 094 | 2 828 894 | 2 674 736 | 3 052 475 | 887 546 | 1 592 618 | 2 836 495 | 1 533 193 | 417 934 | 1 381 040 |
| 2030-2031 | 2 803 185 | 4 626 120 | 4 691 840 | 4 043 543 | 4 259 112 | 4 823 615 | 2 475 362 | 1 740 797 | 2 052 034 | 728 772 | 0 | 885 265 |
| 2031-2032 | 4 556 596 | 4 538 037 | 4 524 213 | 3 844 035 | 4 161 230 | 4 091 920 | 2 600 089 | 2 894 476 | 3 225 749 | 1 215 260 | 0 | 5 027 057 |
| 2032-2033 | 6 435 655 | 3 110 988 | 4 692 150 | 4 785 653 | 4 444 250 | 4 802 036 | 3 166 447 | 3 059 877 | 915 396 | 454 219 | 1 266 044 | 3 553 659 |
| 2033-2034 | 2 293 751 | 5 247 044 | 4 432 709 | 3 042 136 | 4 087 797 | 5 035 423 | 2 846 226 | 3 769 250 | 1 563 033 | 921 671 | 1 007 466 | 2 414 166 |
| 2034-2035 | 4 102 445 | 3 986 873 | 3 172 684 | 4 197 553 | 4 121 752 | 4 294 044 | 2 760 242 | 3 503 871 | 4 454 476 | 3 025 528 | 867 716 | 1 695 204 |
| 2035-2036 | 4 253 864 | 2 215 706 | 1 967 424 | 3 872 396 | 3 892 500 | 4 799 934 | 3 821 600 | 1 791 993 | 1 706 662 | 267 403 | 1 513 316 | 345 259 |
| 2036-2037 | 2 896 251 | 5 303 482 | 4 611 413 | 3 063 855 | 4 224 357 | 4 369 128 | 2 870 248 | 2 166 196 | 3 530 886 | 1 205 662 | 0 | 519 082 |
| 2037-2038 | 3 247 914 | 5 364 753 | 4 571 895 | 3 664 067 | 4 343 072 | 4 427 200 | 1 330 565 | 1 525 981 | 2 268 397 | 1 946 518 | 518 084 | 85 691 |
| 2038-2039 | 3 578 271 | 3 399 599 | 4 800 322 | 1 970 968 | 4 052 124 | 2 858 661 | 2 953 304 | 1 933 405 | 1 614 057 | 0 | 0 | 1 025 787 |
| 2039-2040 | 3 366 566 | 5 034 401 | 3 809 770 | 3 063 320 | 2 885 815 | 3 130 990 | 1 195 743 | 1 819 780 | 3 167 213 | 1 360 040 | 513 824 | 2 584 922 |
| 2040-2041 | 2 862 299 | 4 867 946 | 4 530 992 | 3 939 722 | 4 164 997 | 4 774 992 | 2 786 845 | 1 449 418 | 1 555 314 | 1 035 722 | 0 | 676 728 |
| 2041-2042 | 4 260 499 | 4 425 701 | 4 271 917 | 3 542 190 | 4 152 581 | 3 775 947 | 2 796 300 | 2 697 230 | 2 843 247 | 1 330 169 | 54 352 | 4 783 333 |
| 2042-2043 | 6 464 732 | 3 088 464 | 4 460 115 | 4 606 080 | 4 480 298 | 4 682 172 | 3 374 587 | 2 778 140 | 573 437 | 633 545 | 1 448 975 | 3 451 038 |
| 2043-2044 | 1 899 198 | 5 109 886 | 4 237 246 | 2 951 300 | 3 538 806 | 4 964 975 | 3 082 670 | 3 635 730 | 1 184 189 | 1 049 486 | 1 066 607 | 2 067 945 |
| 2044-2045 | 3 662 073 | 3 917 770 | 2 926 289 | 4 068 759 | 4 114 167 | 3 522 623 | 3 204 654 | 3 759 336 | 2 875 021 | 2 766 660 | 1 130 937 | 2 556 143 |
| 2045-2046 | 2 747 232 | 1 838 061 | 1 378 126 | 4 168 964 | 3 053 401 | 4 543 998 | 2 659 617 | 1 925 533 | 1 246 216 | 1 311 645 | 302 369 | 0 |
| 2046-2047 | 4 159 808 | 5 018 177 | 3 727 386 | 3 764 105 | 3 536 087 | 4 774 170 | 1 725 775 | 2 767 348 | 2 321 591 | 316 610 | 0 | 1 592 164 |
| 2047-2048 | 3 862 966 | 5 106 855 | 4 336 616 | 3 752 021 | 4 781 631 | 3 717 563 | 562 352 | 972 320 | 3 365 491 | 0 | 80 094 | 1 048 195 |
| 2048-2049 | 4 114 630 | 3 273 159 | 4 386 971 | 2 579 390 | 3 698 269 | 2 341 374 | 2 164 903 | 838 034 | 1 351 152 | 0 | 478 000 | 314 774 |
| 2049-2050 | 4 521 802 | 4 774 057 | 2 867 698 | 3 823 940 | 2 665 184 | 1 822 680 | 886 282 | 3 153 380 | 2 069 370 | 1 549 486 | 991 205 | 2 191 507 |
| 2050-2051 | 3 341 315 | 4 640 355 | 4 373 654 | 3 939 810 | 4 436 435 | 4 143 609 | 2 174 681 | 636 734 | 1 598 249 | 721 059 | 0 | 1 933 580 |
| 2051-2052 | 4 548 290 | 4 679 357 | 4 273 592 | 4 153 073 | 3 405 707 | 4 662 676 | 1 715 713 | 2 563 064 | 3 456 310 | 0 | 1 541 865 | 6 751 106 |
| 2052-2053 | 4 683 317 | 3 876 303 | 1 663 290 | 4 827 277 | 4 489 825 | 3 406 324 | 3 644 030 | 1 461 609 | 821 679 | 83 458 | 1 440 516 | 3 653 348 |
| 2053-2054 | 4 023 989 | 4 761 184 | 4 059 938 | 3 009 675 | 3 948 527 | 4 475 475 | 3 418 902 | 2 446 825 | 1 854 809 | 303 937 | 2 328 482 | 3 597 050 |
| 2054-2055 | 3 441 817 | 3 811 989 | 2 779 077 | 3 264 783 | 3 825 431 | 3 448 979 | 3 192 216 | 3 459 992 | 3 087 665 | 3 054 657 | 867 471 | 3 107 706 |
| 2055-2056 | 2 785 566 | 1 494 578 | 1 448 839 | 4 425 283 | 3 675 069 | 4 567 161 | 2 786 406 | 1 095 279 | 1 439 336 | 1 530 881 | 1 013 503 | 600 863 |
| 2056-2057 | 4 577 987 | 4 877 995 | 3 807 147 | 3 492 636 | 3 503 862 | 4 910 525 | 1 474 369 | 2 896 763 | 3 220 391 | 520 331 | 0 | 1 596 537 |
| 2057-2058 | 3 673 779 | 4 989 197 | 4 133 888 | 3 731 287 | 4 815 971 | 3 160 043 | 737 274 | 675 289 | 3 455 453 | 0 | 506 531 | 547 481 |
| 2058-2059 | 4 641 676 | 2 886 819 | 4 174 376 | 3 221 730 | 3 304 659 | 2 702 860 | 2 053 874 | 1 369 168 | 1 663 280 | 77 494 | 1 176 220 | 1 371 332 |
| 2059-2060 | 4 509 061 | 4 690 320 | 2 854 631 | 3 915 569 | 2 136 607 | 1 499 568 | 1 641 768 | 2 833 024 | 2 356 970 | 1 084 799 | 1 327 136 | 2 310 726 |

Annexe 12 : Détermination des besoins en eau d'irrigation des parcelles assistées selon le modèle RACMO22T sur la période 2024-2060 (m³/mois)

| | Oct | Nov | Déc | Janv | Févr | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 2024-2025 | 1 341 870 | 2 525 417 | 1 954 632 | 2 154 857 | 3 733 267 | 3 179 206 | 2 772 282 | 2 749 490 | 3 284 976 | 2 084 839 | 854 881 | 273 897 |
| 2025-2026 | 2 275 144 | 1 280 027 | 875 059 | 2 418 804 | 2 972 927 | 3 530 649 | 3 616 517 | 2 120 297 | 1 479 442 | 434 208 | 716 234 | 566 186 |
| 2026-2027 | 447 287 | 2 802 940 | 2 922 762 | 1 398 276 | 3 632 422 | 3 347 581 | 4 167 440 | 1 091 447 | 1 879 284 | 1 421 130 | 428 026 | 0 |
| 2027-2028 | 1 100 063 | 2 758 694 | 2 998 657 | 1 917 869 | 3 639 029 | 4 145 325 | 2 399 311 | 362 857 | 1 853 963 | 1 831 451 | 166 528 | 494 274 |
| 2028-2029 | 824 845 | 2 496 703 | 2 414 447 | 1 826 383 | 2 695 567 | 2 400 796 | 2 600 772 | 1 251 670 | 1 961 267 | 402 339 | 624 645 | 0 |
| 2029-2030 | 800 966 | 2 576 273 | 2 208 345 | 1 947 106 | 2 260 210 | 3 055 025 | 1 014 780 | 717 362 | 3 549 618 | 1 120 257 | 342 477 | 102 995 |
| 2030-2031 | 1 577 084 | 2 842 180 | 2 936 203 | 2 701 523 | 3 437 900 | 4 360 070 | 2 203 954 | 1 344 485 | 1 474 689 | 542 476 | 0 | 386 593 |
| 2031-2032 | 3 024 106 | 3 201 410 | 3 345 879 | 3 021 149 | 3 894 139 | 4 065 565 | 2 815 921 | 2 773 232 | 2 747 404 | 1 011 520 | 0 | 3 648 575 |
| 2032-2033 | 4 130 558 | 1 602 609 | 2 977 369 | 3 347 062 | 3 512 413 | 4 256 965 | 2 770 786 | 2 573 056 | 594 565 | 337 611 | 558 702 | 2 179 706 |
| 2033-2034 | 1 178 635 | 3 242 932 | 2 822 010 | 2 150 814 | 2 949 252 | 4 519 316 | 2 396 733 | 3 232 819 | 1 100 215 | 640 255 | 483 856 | 1 272 384 |
| 2034-2035 | 2 159 004 | 2 216 034 | 1 969 087 | 2 910 111 | 2 838 070 | 3 775 953 | 2 361 790 | 2 850 492 | 3 336 034 | 2 028 322 | 427 004 | 738 934 |
| 2035-2036 | 2 277 821 | 1 010 921 | 115 065 | 2 668 045 | 2 716 676 | 4 272 376 | 3 373 432 | 1 355 048 | 1 122 284 | 191 232 | 753 633 | 19 413 |
| 2036-2037 | 1 580 287 | 3 327 207 | 2 995 612 | 2 235 374 | 3 439 084 | 3 700 236 | 2 547 588 | 1 579 363 | 2 610 564 | 847 138 | 0 | 192 192 |
| 2037-2038 | 1 523 825 | 3 364 924 | 2 973 341 | 2 551 824 | 3 567 118 | 3 760 827 | 1 034 683 | 1 043 928 | 1 558 067 | 1 358 506 | 154 307 | 0 |
| 2038-2039 | 1 732 489 | 1 910 029 | 3 151 016 | 1 278 759 | 3 015 258 | 1 948 212 | 2 484 502 | 1 369 329 | 1 113 772 | 1 468 | 0 | 530 193 |
| 2039-2040 | 1 669 509 | 3 164 415 | 2 042 307 | 2 129 571 | 2 007 011 | 2 418 341 | 844 409 | 1 281 823 | 2 297 953 | 930 028 | 222 045 | 1 438 527 |
| 2040-2041 | 2 025 679 | 3 850 333 | 3 728 077 | 3 584 858 | 4 354 911 | 5 699 953 | 3 764 201 | 1 903 092 | 1 900 265 | 886 542 | 0 | 456 116 |
| 2041-2042 | 2 475 403 | 2 727 283 | 2 825 669 | 2 631 119 | 3 485 339 | 3 800 314 | 2 795 170 | 2 580 862 | 2 411 328 | 925 844 | 105 187 | 3 022 408 |
| 2042-2043 | 4 181 903 | 1 715 155 | 2 983 612 | 3 449 641 | 3 834 540 | 4 484 417 | 3 430 003 | 2 732 243 | 622 530 | 413 396 | 932 868 | 2 169 653 |
| 2043-2044 | 1 191 089 | 3 268 569 | 2 844 382 | 2 242 230 | 3 183 927 | 4 742 194 | 3 162 778 | 3 365 919 | 1 122 256 | 705 818 | 646 373 | 1 209 778 |
| 2044-2045 | 2 089 141 | 2 314 117 | 2 221 024 | 2 995 859 | 3 600 331 | 3 687 189 | 3 296 342 | 3 392 164 | 2 334 388 | 1 844 562 | 784 780 | 1 480 445 |
| 2045-2046 | 1 414 856 | 1 538 391 | 2 224 505 | 3 093 399 | 2 907 789 | 4 399 032 | 2 596 803 | 1 870 312 | 1 186 235 | 878 261 | 282 796 | 0 |
| 2046-2047 | 2 427 979 | 3 232 069 | 2 573 292 | 2 795 611 | 3 090 709 | 4 598 341 | 1 735 485 | 2 585 355 | 1 958 418 | 242 014 | 45 633 | 855 880 |
| 2047-2048 | 2 205 976 | 3 290 685 | 2 937 565 | 2 776 043 | 4 046 333 | 3 761 635 | 744 722 | 1 270 190 | 2 610 909 | 0 | 121 139 | 511 015 |
| 2048-2049 | 2 379 698 | 1 898 342 | 2 986 788 | 2 039 098 | 3 394 919 | 2 511 862 | 2 388 784 | 978 595 | 1 135 931 | 0 | 333 431 | 78 532 |
| 2049-2050 | 2 781 627 | 3 094 430 | 2 653 348 | 2 860 196 | 2 313 057 | 2 203 699 | 959 105 | 2 704 144 | 1 626 469 | 1 048 489 | 588 408 | 1 223 383 |
| 2050-2051 | 2 081 461 | 3 016 934 | 3 007 545 | 3 024 608 | 3 760 630 | 4 052 559 | 2 713 631 | 1 693 496 | 1 261 446 | 258 624 | 0 | 975 911 |
| 2051-2052 | 3 129 439 | 3 363 962 | 3 236 309 | 3 420 004 | 3 187 368 | 4 896 129 | 2 435 231 | 3 181 502 | 3 058 345 | 0 | 957 625 | 4 842 797 |
| 2052-2053 | 2 979 704 | 2 438 399 | 1 104 233 | 3 706 418 | 3 792 549 | 3 461 421 | 3 833 598 | 2 233 398 | 682 849 | 0 | 848 895 | 2 299 783 |
| 2053-2054 | 2 514 533 | 3 154 052 | 2 883 130 | 2 302 200 | 3 432 821 | 4 351 584 | 3 433 345 | 2 903 674 | 1 354 038 | 0 | 1 298 349 | 2 209 322 |
| 2054-2055 | 2 014 945 | 2 248 805 | 2 015 348 | 2 495 234 | 3 345 993 | 3 592 862 | 3 386 086 | 3 599 430 | 2 246 561 | 1 718 281 | 463 702 | 1 698 587 |
| 2055-2056 | 1 585 998 | 884 464 | 962 599 | 3 412 009 | 3 259 178 | 4 362 813 | 2 634 312 | 1 730 248 | 1 433 302 | 658 608 | 548 127 | 312 254 |
| 2056-2057 | 2 839 549 | 3 234 245 | 2 494 469 | 2 648 290 | 3 022 497 | 4 610 488 | 1 774 721 | 3 024 010 | 2 211 693 | 107 725 | 0 | 809 005 |
| 2057-2058 | 2 177 961 | 3 318 810 | 2 987 907 | 2 850 792 | 4 052 818 | 3 318 090 | 1 351 755 | 1 703 412 | 2 775 626 | 0 | 254 730 | 197 392 |
| 2058-2059 | 2 858 535 | 1 755 285 | 3 045 585 | 2 156 590 | 2 932 870 | 2 825 938 | 2 663 457 | 1 448 038 | 1 118 308 | 0 | 691 650 | 778 259 |
| 2059-2060 | 2 813 630 | 3 125 433 | 2 041 072 | 2 970 854 | 1 852 891 | 1 725 604 | 1 833 762 | 3 003 437 | 1 648 677 | 321 908 | 803 443 | 1 264 866 |

Annexe 13 : Détermination des besoins en eau d'irrigation des parcelles irriguées selon le modèle RCA4 sur la période 2024-2060 (m³/mois)

| | Oct | Nov | Déc | Janv | Févr | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 2024-2025 | 5 333 270 | 4 596 785 | 3 632 824 | 4 665 934 | 3 211 302 | 4 581 373 | 1 404 170 | 2 423 975 | 4 078 719 | 2 415 334 | 606 360 | 1 777 333 |
| 2025-2026 | 5 258 151 | 3 360 479 | 4 696 626 | 4 446 876 | 3 034 550 | 4 090 634 | 3 208 690 | 838 352 | 997 776 | 0 | 1 708 604 | 1 901 517 |
| 2026-2027 | 4 726 525 | 5 453 196 | 4 562 688 | 4 059 295 | 4 350 833 | 3 740 498 | 2 493 444 | 1 599 878 | 1 365 543 | 827 878 | 824 465 | 423 383 |
| 2027-2028 | 5 456 500 | 4 674 155 | 4 664 045 | 4 468 094 | 4 427 819 | 3 786 033 | 1 300 634 | 1 351 317 | 960 836 | 1 884 190 | 1 414 716 | 332 095 |
| 2028-2029 | 5 132 776 | 4 111 970 | 4 954 581 | 3 322 538 | 3 132 081 | 1 877 753 | 2 769 143 | 1 203 828 | 1 027 138 | 331 885 | 1 078 734 | 827 890 |
| 2029-2030 | 4 345 870 | 5 157 992 | 4 512 310 | 3 517 772 | 2 733 309 | 2 516 859 | 564 015 | 1 398 299 | 2 674 262 | 1 311 409 | 706 363 | 2 009 131 |
| 2030-2031 | 4 518 341 | 4 704 544 | 4 593 844 | 3 360 361 | 2 487 982 | 2 652 375 | 3 133 541 | 3 503 466 | 1 715 162 | 2 041 445 | 1 912 576 | 1 804 427 |
| 2031-2032 | 3 489 874 | 4 046 246 | 4 583 133 | 2 742 702 | 1 964 396 | 2 618 543 | 3 266 514 | 1 266 763 | 2 189 040 | 2 862 600 | 1 508 580 | 1 140 255 |
| 2032-2033 | 3 610 710 | 3 943 315 | 4 345 962 | 3 967 118 | 4 447 172 | 4 755 459 | 2 088 580 | 1 527 733 | 1 520 227 | 634 565 | 457 288 | 2 166 408 |
| 2033-2034 | 5 415 375 | 4 635 286 | 4 479 942 | 4 154 369 | 4 063 736 | 3 678 944 | 2 551 788 | 2 574 513 | 2 379 972 | 1 114 629 | 525 411 | 5 402 388 |
| 2034-2035 | 6 218 592 | 3 088 409 | 4 808 877 | 4 765 773 | 4 374 902 | 4 792 493 | 2 751 948 | 2 392 313 | 409 182 | 215 462 | 1 956 819 | 3 792 004 |
| 2035-2036 | 4 151 001 | 5 411 071 | 4 734 606 | 3 744 962 | 3 338 392 | 4 644 395 | 2 305 260 | 3 316 547 | 872 275 | 724 554 | 1 292 175 | 3 426 900 |
| 2036-2037 | 5 096 526 | 3 934 816 | 3 069 251 | 4 609 227 | 2 754 185 | 3 881 883 | 2 201 389 | 3 110 586 | 4 188 558 | 2 719 668 | 1 272 746 | 2 849 827 |
| 2037-2038 | 5 104 309 | 2 203 968 | 0 | 4 415 505 | 2 888 202 | 4 804 837 | 3 519 512 | 1 387 812 | 1 289 595 | 157 636 | 2 123 097 | 2 400 396 |
| 2038-2039 | 4 408 960 | 5 409 257 | 4 958 229 | 3 367 245 | 4 097 867 | 3 699 480 | 2 533 566 | 1 406 441 | 2 093 768 | 721 773 | 196 511 | 1 142 443 |
| 2039-2040 | 4 118 841 | 4 593 525 | 4 569 474 | 4 055 815 | 4 191 923 | 3 498 780 | 1 131 100 | 670 936 | 1 266 809 | 1 785 065 | 756 758 | 723 452 |
| 2040-2041 | 4 420 699 | 3 038 573 | 4 677 631 | 4 134 931 | 3 454 145 | 1 885 925 | 2 465 946 | 1 624 536 | 1 074 873 | 16 737 | 410 295 | 1 526 195 |
| 2041-2042 | 4 628 382 | 5 124 624 | 3 146 407 | 3 836 439 | 2 427 635 | 2 321 880 | 1 002 975 | 1 538 750 | 2 806 089 | 936 004 | 1 104 136 | 3 293 873 |
| 2042-2043 | 3 825 359 | 5 080 328 | 4 428 820 | 4 342 091 | 2 788 517 | 2 868 777 | 3 570 997 | 4 150 692 | 2 782 629 | 2 378 288 | 1 842 182 | 2 589 317 |
| 2043-2044 | 3 364 207 | 3 614 286 | 3 488 247 | 3 248 752 | 3 039 820 | 2 985 302 | 2 958 024 | 2 709 939 | 2 361 213 | 2 455 500 | 2 357 011 | 1 810 557 |
| 2044-2045 | 3 572 900 | 3 660 173 | 4 802 011 | 3 913 816 | 3 400 671 | 3 081 250 | 2 681 277 | 3 517 107 | 2 293 384 | 2 353 124 | 2 217 685 | 4 773 848 |
| 2045-2046 | 4 352 598 | 2 202 762 | 1 448 796 | 4 753 546 | 2 167 362 | 4 361 910 | 2 381 388 | 1 695 161 | 887 521 | 1 446 124 | 1 985 322 | 3 592 172 |
| 2046-2047 | 5 485 030 | 5 225 968 | 4 418 902 | 4 617 051 | 3 054 360 | 4 671 334 | 1 526 789 | 2 483 692 | 1 673 910 | 23 538 | 704 439 | 3 811 801 |
| 2047-2048 | 4 770 149 | 5 291 179 | 4 548 067 | 4 506 264 | 4 853 485 | 3 131 637 | 296 149 | 578 384 | 3 073 988 | 3 619 | 1 182 972 | 3 500 173 |
| 2048-2049 | 5 537 836 | 3 659 098 | 4 603 717 | 4 042 192 | 3 209 679 | 1 787 486 | 1 711 707 | 664 716 | 992 447 | 0 | 1 697 920 | 2 119 485 |
| 2049-2050 | 5 373 164 | 4 971 679 | 3 041 299 | 4 405 406 | 2 619 427 | 961 454 | 658 726 | 2 959 795 | 1 673 553 | 1 284 509 | 1 876 907 | 4 002 527 |
| 2050-2051 | 4 359 498 | 4 855 803 | 4 653 604 | 4 351 964 | 1 425 426 | 3 184 626 | 3 156 136 | 2 482 765 | 2 513 241 | 2 305 107 | 1 636 325 | 4 027 606 |
| 2051-2052 | 3 010 213 | 4 794 676 | 3 093 213 | 2 002 563 | 2 289 527 | 3 036 928 | 2 270 479 | 2 445 250 | 1 310 222 | 2 307 431 | 1 324 338 | 3 450 786 |
| 2052-2053 | 4 131 919 | 3 755 582 | 1 701 802 | 3 910 113 | 4 300 376 | 3 307 085 | 3 840 213 | 1 523 147 | 308 359 | 0 | 3 005 175 | 5 366 348 |
| 2053-2054 | 5 618 097 | 4 970 385 | 4 362 671 | 4 231 945 | 2 692 856 | 4 502 833 | 3 493 468 | 2 262 738 | 922 114 | 0 | 4 057 462 | 4 697 827 |
| 2054-2055 | 5 559 669 | 5 076 261 | 3 014 430 | 4 467 992 | 2 618 038 | 3 445 549 | 3 249 703 | 3 757 287 | 2 023 101 | 2 114 281 | 2 726 357 | 5 278 433 |
| 2055-2056 | 5 770 559 | 3 545 280 | 1 433 123 | 4 891 079 | 2 550 747 | 4 582 271 | 2 741 414 | 1 282 579 | 1 036 254 | 1 339 142 | 2 768 108 | 4 128 481 |
| 2056-2057 | 5 778 462 | 5 133 340 | 3 756 726 | 4 610 073 | 3 113 942 | 4 922 939 | 1 577 266 | 2 820 020 | 2 566 225 | 0 | 1 757 459 | 4 473 671 |
| 2057-2058 | 5 932 468 | 5 217 753 | 4 457 328 | 4 616 172 | 4 976 207 | 2 725 622 | 863 140 | 569 423 | 3 030 678 | 2 118 | 2 210 844 | 3 991 633 |
| 2058-2059 | 5 848 039 | 5 278 766 | 4 520 457 | 3 594 990 | 2 263 057 | 2 078 159 | 2 239 160 | 1 265 499 | 1 203 610 | 9 214 | 1 812 411 | 2 845 280 |
| 2059-2060 | 5 367 852 | 3 297 255 | 4 691 399 | 3 288 196 | 1 238 801 | 1 413 706 | 2 589 575 | 1 407 101 | 178 648 | 2 496 999 | 4 685 936 | 5 316 485 |

Annexe 14: Détermination des besoins en eau d'irrigation des parcelles assistées selon le modèle RCA4 sur la période 2024-2060 (m³/mois)

| | Oct | Nov | Déc | Janv | Févr | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|-----------|-----------|
| 2024-2025 | 3 520 010 | 3 413 154 | 2 211 075 | 2 871 899 | 2 760 912 | 4 039 036 | 2 118 170 | 2 661 122 | 1 101 823 | 550 534 | 224 484 | 2 791 957 |
| 2025-2026 | 3 333 740 | 3 385 549 | 3 007 165 | 3 188 662 | 3 450 602 | 3 101 714 | 2 148 107 | 915 619 | 750 522 | 403 963 | 1 644 441 | 2 586 429 |
| 2026-2027 | 3 361 612 | 3 424 887 | 2 819 184 | 3 231 041 | 3 507 956 | 3 696 671 | 3 366 934 | 2 973 064 | 816 097 | 443 931 | 119 412 | 2 485 134 |
| 2027-2028 | 3 667 368 | 3 434 439 | 3 004 813 | 3 323 936 | 3 568 920 | 3 535 051 | 1 501 849 | 1 612 956 | 1 767 893 | 316 018 | 992 423 | 2 662 652 |
| 2028-2029 | 3 901 663 | 3 397 814 | 3 189 704 | 3 037 222 | 3 001 797 | 2 956 013 | 3 033 297 | 1 846 731 | 1 350 302 | 326 071 | 691 086 | 2 422 570 |
| 2029-2030 | 3 757 808 | 3 221 923 | 2 926 006 | 3 106 331 | 1 900 667 | 2 468 992 | 2 130 432 | 974 870 | 1 040 459 | 442 364 | 384 343 | 2 516 999 |
| 2030-2031 | 3 079 851 | 3 186 608 | 2 989 902 | 2 779 390 | 3 268 063 | 3 246 403 | 2 803 750 | 2 414 657 | 740 805 | 109 615 | 895 292 | 2 050 149 |
| 2031-2032 | 3 824 379 | 3 220 737 | 2 990 634 | 3 246 061 | 2 750 551 | 3 394 103 | 2 772 828 | 2 711 052 | 614 297 | 114 736 | 918 785 | 2 743 959 |
| 2032-2033 | 3 205 097 | 3 230 177 | 2 851 243 | 2 742 883 | 3 160 339 | 2 823 872 | 1 216 206 | 1 874 304 | 1 085 027 | 716 310 | 1 333 493 | 3 357 120 |
| 2033-2034 | 3 795 478 | 3 274 106 | 2 840 036 | 3 118 500 | 3 265 474 | 2 671 422 | 2 910 660 | 2 544 091 | 966 934 | 546 760 | 1 432 138 | 3 542 880 |
| 2034-2035 | 3 507 009 | 3 388 609 | 3 039 684 | 3 047 288 | 2 706 976 | 3 191 555 | 3 386 419 | 2 625 112 | 1 342 197 | 24 954 | 617 437 | 3 215 699 |
| 2035-2036 | 5 609 376 | 4 664 153 | 4 169 150 | 4 628 819 | 5 016 608 | 4 761 409 | 4 084 792 | 3 400 336 | 1 593 116 | 114 055 | 1 472 811 | 3 573 372 |
| 2036-2037 | 3 678 268 | 3 368 708 | 3 024 420 | 3 132 943 | 3 094 346 | 3 332 461 | 2 605 644 | 1 849 196 | 646 954 | 0 | 807 372 | 3 593 803 |
| 2037-2038 | 4 037 961 | 3 379 237 | 3 156 144 | 3 200 479 | 3 555 560 | 3 735 104 | 1 157 662 | 191 678 | 634 448 | 8 036 | 875 208 | 2 074 674 |
| 2038-2039 | 4 037 961 | 3 379 237 | 3 156 144 | 3 200 479 | 3 555 560 | 3 735 104 | 1 157 662 | 191 678 | 634 448 | 8 036 | 875 208 | 2 074 674 |
| 2039-2040 | 3 201 012 | 3 130 592 | 2 919 276 | 2 891 046 | 2 897 264 | 2 000 481 | 2 241 652 | 2 566 396 | 939 599 | 0 | 664 734 | 3 386 857 |
| 2040-2041 | 3 737 865 | 3 148 144 | 3 000 557 | 3 332 566 | 3 638 650 | 2 479 928 | 2 489 963 | 2 243 925 | 527 592 | 0 | 643 007 | 2 909 653 |
| 2041-2042 | 3 721 687 | 3 194 556 | 2 986 015 | 3 211 461 | 3 023 856 | 2 752 036 | 2 246 672 | 3 071 422 | 492 563 | 0 | 717 195 | 3 122 829 |
| 2042-2043 | 3 715 099 | 3 216 888 | 2 847 769 | 3 336 657 | 3 386 741 | 2 342 154 | 1 080 847 | 1 824 759 | 1 104 810 | 360 914 | 908 546 | 2 879 425 |
| 2043-2044 | 3 989 962 | 3 267 094 | 2 847 716 | 3 358 487 | 3 695 550 | 2 990 043 | 1 757 196 | 2 833 368 | 1 055 648 | 218 758 | 1 028 927 | 2 874 874 |
| 2044-2045 | 3 800 994 | 3 381 032 | 3 052 524 | 3 186 058 | 3 720 796 | 2 990 043 | 1 757 196 | 2 833 368 | 1 055 648 | 218 758 | 1 028 927 | 2 874 874 |
| 2045-2046 | 4 015 076 | 3 221 693 | 3 002 349 | 3 522 303 | 3 623 772 | 2 411 626 | 2 679 122 | 2 010 875 | 914 340 | 515 596 | 1 734 108 | 3 701 410 |
| 2046-2047 | 3 970 905 | 3 285 308 | 2 947 349 | 3 453 063 | 4 037 215 | 2 953 814 | 3 074 375 | 2 241 171 | 299 401 | 149 659 | 2 171 200 | 3 503 209 |
| 2047-2048 | 3 970 905 | 3 285 308 | 2 947 349 | 3 453 063 | 4 037 215 | 2 959 716 | 3 071 076 | 2 230 374 | 298 187 | 149 659 | 2 168 633 | 3 494 684 |
| 2048-2049 | 3 862 139 | 3 307 438 | 2 988 138 | 3 107 995 | 2 852 705 | 2 754 739 | 2 882 691 | 1 395 522 | 782 274 | 639 474 | 1 935 151 | 2 500 571 |
| 2049-2050 | 3 650 713 | 3 096 904 | 2 953 588 | 2 490 262 | 2 655 668 | 2 188 090 | 2 145 203 | 2 068 251 | 673 925 | 0 | 1 372 848 | 2 974 052 |
| 2050-2051 | 3 592 193 | 3 062 738 | 3 031 463 | 3 127 775 | 3 712 727 | 2 400 307 | 3 103 523 | 1 027 500 | 442 271 | 27 353 | 1 340 340 | 1 294 163 |
| 2051-2052 | 3 775 688 | 3 130 949 | 2 939 329 | 3 425 792 | 3 289 467 | 2 822 293 | 3 045 390 | 1 498 593 | 123 329 | 312 337 | 1 713 486 | 2 970 203 |
| 2052-2053 | 3 773 563 | 3 101 288 | 1 954 744 | 3 226 879 | 3 548 128 | 3 359 368 | 2 875 681 | 2 215 689 | 911 974 | 375 869 | 611 193 | 3 038 628 |
| 2053-2054 | 3 899 503 | 3 022 364 | 2 765 780 | 3 165 066 | 2 727 326 | 1 862 963 | 3 312 446 | 1 960 204 | 407 246 | 6 935 | 1 601 211 | 3 875 146 |
| 2054-2055 | 3 893 896 | 3 244 483 | 2 896 540 | 3 232 135 | 3 302 076 | 2 713 767 | 3 194 014 | 1 752 821 | 803 667 | 157 735 | 1 302 421 | 3 970 459 |
| 2055-2056 | 3 946 222 | 3 124 317 | 2 973 684 | 3 363 922 | 3 377 889 | 2 951 081 | 3 001 571 | 2 203 210 | 437 360 | 349 196 | 1 475 550 | 3 627 795 |
| 2056-2057 | 3 796 080 | 3 020 354 | 2 961 802 | 3 530 528 | 2 155 320 | 2 895 510 | 1 863 757 | 1 420 079 | 887 232 | 257 687 | 770 264 | 3 453 178 |
| 2057-2058 | 3 997 389 | 3 279 355 | 2 875 388 | 3 572 132 | 3 264 203 | 2 663 367 | 1 822 877 | 2 142 459 | 944 029 | 166 399 | 1 942 954 | 3 396 596 |
| 2058-2059 | 3 980 437 | 3 122 706 | 2 847 138 | 3 424 837 | 2 872 187 | 3 476 340 | 2 945 720 | 1 621 730 | 100 895 | 16 840 | 2 749 456 | 3 780 654 |
| 2059-2060 | 3 997 389 | 3 279 355 | 2 875 388 | 3 572 132 | 3 264 203 | 2 672 799 | 1 828 711 | 2 138 383 | 939 717 | 167 913 | 1 947 690 | 3 395 512 |

Annexe 15 : Détermination des besoins en eau d'irrigation des parcelles irriguées selon le modèle REMO2009 sur la période 2024-2060 (m³/mois)

| | Oct | Nov | Déc | Janv | Févr | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 2024-2025 | 2 589 177 | 5 494 651 | 3 704 802 | 3 176 520 | 4 457 695 | 4 464 168 | 3 176 574 | 1 429 269 | 397 907 | 18 819 | 909 438 | 0 |
| 2025-2026 | 2 834 978 | 5 443 040 | 4 806 001 | 3 584 139 | 4 003 045 | 3 045 365 | 4 130 023 | 1 653 447 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2026-2027 | 1 233 546 | 5 223 247 | 4 671 569 | 3 197 317 | 4 311 142 | 4 982 995 | 3 611 836 | 1 302 260 | 344 229 | 151 023 | 1 798 972 | 0 |
| 2027-2028 | 3 820 803 | 5 063 799 | 4 770 314 | 4 218 942 | 3 980 100 | 3 440 540 | 1 486 416 | 598 302 | 0 | 1 168 368 | 1 767 631 | 707 245 |
| 2028-2029 | 1 727 873 | 4 642 857 | 5 060 484 | 3 921 901 | 4 171 126 | 4 693 991 | 3 945 317 | 315 704 | 455 519 | 0 | 143 240 | 0 |
| 2029-2030 | 1 859 615 | 5 121 615 | 4 620 237 | 2 937 803 | 4 019 453 | 4 233 491 | 3 833 272 | 2 869 353 | 21 227 | 0 | 0 | 8 897 |
| 2030-2031 | 2 841 322 | 5 055 299 | 4 696 742 | 3 521 342 | 3 975 983 | 4 992 619 | 2 044 969 | 1 944 079 | 144 731 | 110 359 | 988 111 | 0 |
| 2031-2032 | 1 032 131 | 4 438 392 | 4 509 889 | 3 310 760 | 4 042 338 | 4 588 092 | 3 808 872 | 984 891 | 72 063 | 0 | 518 971 | 1 281 312 |
| 2032-2033 | 2 313 261 | 5 354 547 | 4 712 207 | 3 703 189 | 3 675 047 | 3 175 286 | 2 369 056 | 531 262 | 112 212 | 1 715 025 | 0 | 585 201 |
| 2033-2034 | 2 332 512 | 5 217 419 | 4 481 177 | 3 114 452 | 4 319 346 | 4 302 267 | 1 242 341 | 1 580 075 | 1 677 009 | 0 | 0 | 0 |
| 2034-2035 | 4 412 554 | 5 385 831 | 4 811 300 | 3 429 023 | 4 531 052 | 5 209 005 | 4 117 545 | 1 415 272 | 0 | 380 722 | 1 376 172 | 502 968 |
| 2035-2036 | 0 | 5 346 410 | 4 737 024 | 3 056 426 | 4 384 334 | 4 562 790 | 3 093 660 | 714 531 | 235 599 | 0 | 207 492 | 0 |
| 2036-2037 | 1 880 077 | 5 358 826 | 4 769 246 | 3 157 221 | 4 265 965 | 3 150 137 | 1 626 245 | 3 075 553 | 435 408 | 1 631 506 | 1 916 972 | 0 |
| 2037-2038 | 2 803 799 | 5 267 616 | 4 709 995 | 3 095 990 | 4 156 687 | 4 078 440 | 3 771 088 | 263 975 | 381 787 | 519 306 | 882 984 | 339 875 |
| 2038-2039 | 1 771 935 | 5 368 450 | 4 959 594 | 3 069 596 | 4 243 684 | 2 651 791 | 2 541 262 | 2 053 626 | 72 529 | 112 565 | 47 439 | 766 588 |
| 2039-2040 | 2 029 951 | 5 059 240 | 4 571 871 | 2 887 168 | 3 867 421 | 4 752 927 | 1 249 826 | 44 290 | 773 325 | 0 | 498 712 | 0 |
| 2040-2041 | 3 372 901 | 4 988 193 | 4 681 746 | 3 319 539 | 4 169 989 | 2 203 978 | 1 760 823 | 1 952 090 | 1 255 473 | 1 147 570 | 1 604 453 | 1 382 174 |
| 2041-2042 | 3 810 000 | 4 742 278 | 4 462 116 | 3 947 931 | 4 377 936 | 3 094 171 | 1 806 719 | 2 256 413 | 960 692 | 44 352 | 464 478 | 0 |
| 2042-2043 | 1 183 896 | 5 368 894 | 4 660 315 | 3 399 450 | 3 701 101 | 4 996 442 | 4 050 521 | 699 013 | 1 382 493 | 0 | 455 205 | 0 |
| 2043-2044 | 2 147 164 | 5 258 936 | 4 457 743 | 3 267 297 | 4 444 193 | 3 319 829 | 4 200 370 | 2 414 625 | 537 661 | 1 134 415 | 879 963 | 0 |
| 2044-2045 | 2 689 572 | 5 445 473 | 4 762 472 | 3 174 971 | 4 979 559 | 4 214 098 | 2 973 561 | 1 336 516 | 11 074 | 342 938 | 0 | 909 775 |
| 2045-2046 | 5 826 849 | 5 186 588 | 4 684 092 | 4 969 039 | 4 682 244 | 2 081 392 | 3 956 330 | 1 174 307 | 0 | 254 868 | 0 | 359 458 |
| 2046-2047 | 3 709 735 | 5 196 074 | 4 557 035 | 3 343 053 | 4 241 163 | 3 717 685 | 3 516 359 | 0 | 901 207 | 0 | 0 | 886 397 |
| 2047-2048 | 2 786 439 | 5 100 198 | 4 543 679 | 3 436 691 | 4 720 690 | 2 325 035 | 2 348 114 | 1 396 121 | 607 475 | 569 538 | 0 | 392 470 |
| 2048-2049 | 5 499 294 | 5 265 013 | 4 599 329 | 3 974 832 | 4 505 964 | 3 799 180 | 2 615 012 | 133 972 | 418 809 | 0 | 901 834 | 0 |
| 2049-2050 | 3 830 953 | 4 926 898 | 4 537 241 | 3 122 868 | 4 242 195 | 3 236 564 | 1 083 844 | 1 006 593 | 22 021 | 0 | 0 | 153 132 |
| 2050-2051 | 3 979 450 | 4 833 556 | 4 628 340 | 3 193 497 | 3 325 489 | 2 828 324 | 3 850 417 | 844 801 | 1 065 497 | 195 394 | 26 282 | 480 692 |
| 2051-2052 | 981 182 | 5 257 214 | 3 149 434 | 3 373 158 | 4 124 442 | 3 981 294 | 1 855 249 | 437 793 | 537 553 | 908 509 | 1 021 122 | 483 107 |
| 2052-2053 | 249 268 | 3 369 000 | 2 045 302 | 2 590 402 | 3 426 340 | 3 670 071 | 1 899 766 | 552 737 | 697 759 | 1 147 875 | 1 236 275 | 641 051 |
| 2053-2054 | 3 820 294 | 5 011 058 | 4 406 524 | 3 026 453 | 4 600 220 | 3 491 052 | 2 140 054 | 1 255 021 | 169 360 | 138 677 | 2 597 680 | 614 627 |
| 2054-2055 | 4 957 300 | 5 372 706 | 4 580 193 | 3 775 452 | 4 175 252 | 4 341 293 | 2 152 650 | 680 578 | 531 261 | 0 | 2 278 775 | 541 850 |
| 2055-2056 | 4 092 073 | 5 154 477 | 4 610 927 | 3 286 052 | 4 632 055 | 4 620 830 | 3 626 396 | 1 541 520 | 156 193 | 0 | 0 | 776 981 |
| 2056-2057 | 3 085 444 | 5 154 609 | 4 480 029 | 4 894 994 | 4 048 756 | 4 858 732 | 5 418 806 | 364 104 | 0 | 3 036 652 | 1 010 736 | 722 609 |
| 2057-2058 | 4 938 945 | 5 239 015 | 4 484 408 | 3 794 222 | 3 637 917 | 4 977 800 | 2 300 905 | 603 813 | 109 790 | 0 | 173 295 | 0 |
| 2058-2059 | 5 476 849 | 5 300 021 | 4 547 488 | 4 178 576 | 4 481 441 | 4 972 359 | 4 176 179 | 992 174 | 0 | 0 | 339 491 | 0 |
| 2059-2060 | 3 439 104 | 4 942 020 | 4 488 459 | 3 210 777 | 4 617 602 | 3 904 417 | 1 317 580 | 563 180 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Annexe 16 : Détermination des besoins en eau d'irrigation des parcelles assistées selon le modèle REMO2009 sur la période 2024-2060 (m³/mois)

| | Oct | Nov | Déc | Janv | Févr | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| 2024-2025 | 1 495 609 | 3 319 265 | 2 188 238 | 2 190 936 | 3 561 759 | 4 334 263 | 3 381 976 | 1 697 997 | 411 618 | 20 680 | 516 382 | 0 |
| 2025-2026 | 1 641 364 | 3 310 818 | 2 971 909 | 2 397 184 | 3 220 578 | 3 247 551 | 4 179 051 | 1 764 286 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2026-2027 | 666 930 | 3 157 069 | 2 901 889 | 2 218 652 | 3 458 120 | 4 666 815 | 3 801 887 | 1 512 346 | 339 224 | 118 358 | 1 090 557 | 0 |
| 2027-2028 | 2 208 556 | 3 042 951 | 2 970 177 | 2 846 878 | 3 212 021 | 3 575 218 | 1 821 522 | 901 549 | 0 | 775 760 | 1 038 461 | 368 733 |
| 2028-2029 | 962 192 | 2 743 907 | 3 155 217 | 2 666 521 | 3 358 941 | 4 420 892 | 4 003 156 | 458 064 | 466 110 | 0 | 92 563 | 0 |
| 2029-2030 | 1 138 221 | 3 131 031 | 2 890 817 | 2 059 095 | 3 240 028 | 4 070 345 | 3 880 410 | 2 894 682 | 31 234 | 0 | 0 | 5 416 |
| 2030-2031 | 1 631 840 | 3 103 036 | 2 951 794 | 2 423 392 | 3 219 424 | 4 648 401 | 2 316 691 | 2 056 094 | 180 266 | 100 284 | 578 353 | 0 |
| 2031-2032 | 433 260 | 2 657 641 | 2 845 171 | 2 312 012 | 3 255 858 | 4 374 466 | 3 821 006 | 1 154 941 | 93 770 | 0 | 316 369 | 741 397 |
| 2032-2033 | 1 227 100 | 3 289 931 | 2 980 328 | 2 562 414 | 3 011 038 | 3 281 284 | 2 637 225 | 721 919 | 140 407 | 1 127 957 | 0 | 285 904 |
| 2033-2034 | 1 421 393 | 3 209 388 | 2 841 968 | 2 204 988 | 3 491 406 | 4 191 780 | 1 500 943 | 1 684 830 | 1 407 020 | 0 | 0 | 0 |
| 2034-2035 | 2 677 531 | 3 301 935 | 3 042 461 | 2 395 282 | 3 667 771 | 4 848 554 | 4 105 370 | 1 316 770 | 0 | 285 984 | 846 743 | 249 971 |
| 2035-2036 | 0 | 3 285 412 | 2 998 427 | 2 178 398 | 3 539 504 | 4 352 068 | 3 338 376 | 1 040 602 | 250 665 | 0 | 118 987 | 0 |
| 2036-2037 | 2 253 242 | 6 447 466 | 5 846 850 | 4 280 734 | 6 487 514 | 6 132 152 | 2 977 222 | 5 320 582 | 704 200 | 1 928 104 | 2 096 500 | 0 |
| 2037-2038 | 1 667 795 | 3 235 673 | 2 991 602 | 2 206 620 | 3 381 565 | 4 021 234 | 3 860 072 | 410 839 | 346 699 | 335 175 | 521 151 | 155 443 |
| 2038-2039 | 932 263 | 3 324 024 | 3 156 276 | 2 158 949 | 3 424 092 | 2 879 095 | 2 769 726 | 2 219 690 | 91 413 | 93 382 | 37 238 | 402 110 |
| 2039-2040 | 1 279 078 | 3 140 552 | 2 922 061 | 2 067 851 | 3 151 539 | 4 442 799 | 1 233 961 | 75 806 | 683 801 | 0 | 291 481 | 0 |
| 2040-2041 | 2 060 332 | 3 090 990 | 3 004 459 | 2 388 885 | 3 405 459 | 2 571 876 | 2 006 001 | 1 890 182 | 911 905 | 704 913 | 1 025 778 | 827 164 |
| 2041-2042 | 2 244 530 | 2 897 587 | 2 868 428 | 2 797 492 | 3 572 563 | 3 310 138 | 2 187 891 | 2 231 709 | 698 396 | 43 396 | 280 850 | 0 |
| 2042-2043 | 512 630 | 3 331 848 | 3 000 875 | 2 451 937 | 3 114 471 | 4 674 246 | 4 002 371 | 705 491 | 1 068 790 | 0 | 266 847 | 0 |
| 2043-2044 | 1 243 006 | 3 263 106 | 2 866 162 | 2 348 377 | 3 628 258 | 3 312 024 | 4 136 765 | 2 334 155 | 523 996 | 768 114 | 505 505 | 0 |
| 2044-2045 | 1 608 598 | 3 381 566 | 3 071 004 | 2 290 201 | 4 111 803 | 4 141 668 | 3 214 604 | 1 282 480 | 14 979 | 248 275 | 0 | 472 523 |
| 2045-2046 | 3 698 699 | 3 228 043 | 3 020 457 | 3 515 791 | 3 850 742 | 2 143 501 | 3 916 077 | 1 371 726 | 0 | 189 923 | 0 | 157 351 |
| 2046-2047 | 2 354 512 | 3 243 694 | 2 954 337 | 2 409 011 | 3 530 790 | 3 765 147 | 3 509 736 | 0 | 767 517 | 0 | 0 | 465 657 |
| 2047-2048 | 1 579 504 | 3 185 961 | 2 965 421 | 2 466 275 | 3 903 382 | 2 542 525 | 2 382 439 | 1 310 025 | 537 116 | 375 945 | 0 | 187 824 |
| 2048-2049 | 3 482 694 | 3 313 778 | 3 006 104 | 2 853 553 | 3 727 285 | 3 775 806 | 2 860 243 | 156 408 | 386 015 | 0 | 502 858 | 0 |
| 2049-2050 | 2 471 089 | 3 103 254 | 2 971 597 | 2 270 410 | 3 514 318 | 3 339 642 | 1 445 191 | 1 157 025 | 25 716 | 0 | 0 | 63 908 |
| 2050-2051 | 2 490 766 | 3 068 657 | 3 072 401 | 2 389 395 | 2 962 821 | 3 157 576 | 3 916 777 | 1 114 103 | 1 048 623 | 170 553 | 24 661 | 303 164 |
| 2051-2052 | 2 016 771 | 3 091 483 | 3 013 107 | 2 615 539 | 3 737 893 | 2 758 075 | 3 297 583 | 1 241 611 | 756 748 | 0 | 51 728 | 505 148 |
| 2052-2053 | 534 115 | 3 325 464 | 2 046 864 | 2 522 133 | 3 566 919 | 4 077 540 | 2 140 823 | 549 693 | 546 928 | 701 247 | 718 252 | 300 744 |
| 2053-2054 | 2 440 197 | 3 173 880 | 2 913 514 | 2 265 562 | 3 944 243 | 3 777 478 | 2 353 135 | 1 449 803 | 194 213 | 131 529 | 1 829 229 | 399 321 |
| 2054-2055 | 3 080 317 | 3 405 150 | 3 031 879 | 2 809 079 | 3 650 583 | 4 368 530 | 2 338 421 | 796 056 | 540 480 | 0 | 1 615 441 | 310 913 |
| 2055-2056 | 2 657 432 | 3 278 453 | 3 062 305 | 2 413 857 | 3 853 346 | 4 408 187 | 3 616 915 | 1 467 023 | 153 596 | 0 | 0 | 381 945 |
| 2056-2057 | 1 898 543 | 3 275 940 | 3 003 643 | 3 561 088 | 3 407 945 | 4 594 618 | 4 953 020 | 459 362 | 0 | 1 907 358 | 554 354 | 352 888 |
| 2057-2058 | 3 102 205 | 3 336 045 | 3 013 818 | 2 768 507 | 3 148 275 | 4 695 696 | 2 634 815 | 702 762 | 106 282 | 0 | 104 593 | 0 |
| 2058-2059 | 3 488 855 | 3 376 114 | 3 058 792 | 3 055 552 | 3 733 803 | 4 647 101 | 4 003 402 | 934 609 | 0 | 0 | 203 410 | 0 |
| 2059-2060 | 2 166 749 | 3 153 416 | 3 034 994 | 2 381 874 | 3 856 896 | 3 868 295 | 1 331 373 | 627 054 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Annexe 17: Détermination des besoins en eau d'irrigation des parcelles assistées selon le modèle REMO2009 sur la période 2024-2060 (m³/mois)

| | Oct | Nov | Déc | Janv | Févr | Mars | Avr | Mai | Juin | Juil | Août | Sept |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| 2024-2025 | 1 495 609 | 3 319 265 | 2 188 238 | 2 190 936 | 3 561 759 | 4 334 263 | 3 381 976 | 1 697 997 | 411 618 | 20 680 | 516 382 | 0 |
| 2025-2026 | 1 641 364 | 3 310 818 | 2 971 909 | 2 397 184 | 3 220 578 | 3 247 551 | 4 179 051 | 1 764 286 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2026-2027 | 666 930 | 3 157 069 | 2 901 889 | 2 218 652 | 3 458 120 | 4 666 815 | 3 801 887 | 1 512 346 | 339 224 | 118 358 | 1 090 557 | 0 |
| 2027-2028 | 2 208 556 | 3 042 951 | 2 970 177 | 2 846 878 | 3 212 021 | 3 575 218 | 1 821 522 | 901 549 | 0 | 775 760 | 1 038 461 | 368 733 |
| 2028-2029 | 962 192 | 2 743 907 | 3 155 217 | 2 666 521 | 3 358 941 | 4 420 892 | 4 003 156 | 458 064 | 466 110 | 0 | 92 563 | 0 |
| 2029-2030 | 1 138 221 | 3 131 031 | 2 890 817 | 2 059 095 | 3 240 028 | 4 070 345 | 3 880 410 | 2 894 682 | 31 234 | 0 | 0 | 5 416 |
| 2030-2031 | 1 631 840 | 3 103 036 | 2 951 794 | 2 423 392 | 3 219 424 | 4 648 401 | 2 316 691 | 2 056 094 | 180 266 | 100 284 | 578 353 | 0 |
| 2031-2032 | 433 260 | 2 657 641 | 2 845 171 | 2 312 012 | 3 255 858 | 4 374 466 | 3 821 006 | 1 154 941 | 93 770 | 0 | 316 369 | 741 397 |
| 2032-2033 | 1 227 100 | 3 289 931 | 2 980 328 | 2 562 414 | 3 011 038 | 3 281 284 | 2 637 225 | 721 919 | 140 407 | 1 127 957 | 0 | 285 904 |
| 2033-2034 | 1 421 393 | 3 209 388 | 2 841 968 | 2 204 988 | 3 491 406 | 4 191 780 | 1 500 943 | 1 684 830 | 1 407 020 | 0 | 0 | 0 |
| 2034-2035 | 2 677 531 | 3 301 935 | 3 042 461 | 2 395 282 | 3 667 771 | 4 848 554 | 4 105 370 | 1 316 770 | 0 | 285 984 | 846 743 | 249 971 |
| 2035-2036 | 0 | 3 285 412 | 2 998 427 | 2 178 398 | 3 539 504 | 4 352 068 | 3 338 376 | 1 040 602 | 250 665 | 0 | 118 987 | 0 |
| 2036-2037 | 2 253 242 | 6 447 466 | 5 846 850 | 4 280 734 | 6 487 514 | 6 132 152 | 2 977 222 | 5 320 582 | 704 200 | 1 928 104 | 2 096 500 | 0 |
| 2037-2038 | 1 667 795 | 3 235 673 | 2 991 602 | 2 206 620 | 3 381 565 | 4 021 234 | 3 860 072 | 410 839 | 346 699 | 335 175 | 521 151 | 155 443 |
| 2038-2039 | 932 263 | 3 324 024 | 3 156 276 | 2 158 949 | 3 424 092 | 2 879 095 | 2 769 726 | 2 219 690 | 91 413 | 93 382 | 37 238 | 402 110 |
| 2039-2040 | 1 279 078 | 3 140 552 | 2 922 061 | 2 067 851 | 3 151 539 | 4 442 799 | 1 233 961 | 75 806 | 683 801 | 0 | 291 481 | 0 |
| 2040-2041 | 2 060 332 | 3 090 990 | 3 004 459 | 2 388 885 | 3 405 459 | 2 571 876 | 2 006 001 | 1 890 182 | 911 905 | 704 913 | 1 025 778 | 827 164 |
| 2041-2042 | 2 244 530 | 2 897 587 | 2 868 428 | 2 797 492 | 3 572 563 | 3 310 138 | 2 187 891 | 2 231 709 | 698 396 | 43 396 | 280 850 | 0 |
| 2042-2043 | 512 630 | 3 331 848 | 3 000 875 | 2 451 937 | 3 114 471 | 4 674 246 | 4 002 371 | 705 491 | 1 068 790 | 0 | 266 847 | 0 |
| 2043-2044 | 1 243 006 | 3 263 106 | 2 866 162 | 2 348 377 | 3 628 258 | 3 312 024 | 4 136 765 | 2 334 155 | 523 996 | 768 114 | 505 505 | 0 |
| 2044-2045 | 1 608 598 | 3 381 566 | 3 071 004 | 2 290 201 | 4 111 803 | 4 141 668 | 3 214 604 | 1 282 480 | 14 979 | 248 275 | 0 | 472 523 |
| 2045-2046 | 3 698 699 | 3 228 043 | 3 020 457 | 3 515 791 | 3 850 742 | 2 143 501 | 3 916 077 | 1 371 726 | 0 | 189 923 | 0 | 157 351 |
| 2046-2047 | 2 354 512 | 3 243 694 | 2 954 337 | 2 409 011 | 3 530 790 | 3 765 147 | 3 509 736 | 0 | 767 517 | 0 | 0 | 465 657 |
| 2047-2048 | 1 579 504 | 3 185 961 | 2 965 421 | 2 466 275 | 3 903 382 | 2 542 525 | 2 382 439 | 1 310 025 | 537 116 | 375 945 | 0 | 187 824 |
| 2048-2049 | 3 482 694 | 3 313 778 | 3 006 104 | 2 853 553 | 3 727 285 | 3 775 806 | 2 860 243 | 156 408 | 386 015 | 0 | 502 858 | 0 |
| 2049-2050 | 2 471 089 | 3 103 254 | 2 971 597 | 2 270 410 | 3 514 318 | 3 339 642 | 1 445 191 | 1 157 025 | 25 716 | 0 | 0 | 63 908 |
| 2050-2051 | 2 490 766 | 3 068 657 | 3 072 401 | 2 389 395 | 2 962 821 | 3 157 576 | 3 916 777 | 1 114 103 | 1 048 623 | 170 553 | 24 661 | 303 164 |
| 2051-2052 | 2 016 771 | 3 091 483 | 3 013 107 | 2 615 539 | 3 737 893 | 2 758 075 | 3 297 583 | 1 241 611 | 756 748 | 0 | 51 728 | 505 148 |
| 2052-2053 | 534 115 | 3 325 464 | 2 046 864 | 2 522 133 | 3 566 919 | 4 077 540 | 2 140 823 | 549 693 | 546 928 | 701 247 | 718 252 | 300 744 |
| 2053-2054 | 2 440 197 | 3 173 880 | 2 913 514 | 2 265 562 | 3 944 243 | 3 777 478 | 2 353 135 | 1 449 803 | 194 213 | 131 529 | 1 829 229 | 399 321 |
| 2054-2055 | 3 080 317 | 3 405 150 | 3 031 879 | 2 809 079 | 3 650 583 | 4 368 530 | 2 338 421 | 796 056 | 540 480 | 0 | 1 615 441 | 310 913 |
| 2055-2056 | 2 657 432 | 3 278 453 | 3 062 305 | 2 413 857 | 3 853 346 | 4 408 187 | 3 616 915 | 1 467 023 | 153 596 | 0 | 0 | 381 945 |
| 2056-2057 | 1 898 543 | 3 275 940 | 3 003 643 | 3 561 088 | 3 407 945 | 4 594 618 | 4 953 020 | 459 362 | 0 | 1 907 358 | 554 354 | 352 888 |
| 2057-2058 | 3 102 205 | 3 336 045 | 3 013 818 | 2 768 507 | 3 148 275 | 4 695 696 | 2 634 815 | 702 762 | 106 282 | 0 | 104 593 | 0 |
| 2058-2059 | 3 488 855 | 3 376 114 | 3 058 792 | 3 055 552 | 3 733 803 | 4 647 101 | 4 003 402 | 934 609 | 0 | 0 | 203 410 | 0 |
| 2059-2060 | 2 166 749 | 3 153 416 | 3 034 994 | 2 381 874 | 3 856 896 | 3 868 295 | 1 331 373 | 627 054 | 0 | 0 | 0 | 0 |

PUBLICATION

Liste de publication

Article

KONATE Y., KOUADIO Z. A., COFFI E. E., COULIBALY W. BRICE. (2025). Influence des paramètres agroclimatiques sur la production de canne à sucre : cas de l'unité agricole intégrée de Borotou Koro, Nord-Ouest Côte d'Ivoire. *International Journal For Multidisciplinary Research*, 7(2): 6-20. <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2025.v07i02.38846>

Actes des colloques

KONATE Y., KOUADIO Z. A., COFFI E. E., COULIBALY W. BRICE. Influence des paramètres agroclimatiques sur la production de canne à sucre : cas de l'unité agricole intégrée de Borotou Koro, Nord-Ouest Côte d'Ivoire. *Crises sécuritaires en Afrique : diagnostics, défis et stratégies pour des solutions durables. Université Péléforo Gon COULIBALY, Korhogo (Côte d'Ivoire). 28 Novembre au 1er Décembre 2023.*

KONATE Y., KOUADIO Z. A., COULIBALY W. BRICE. Impact du changement climatique sur la production du sucre dans l'unité agricole intégrée de Borotou Koro, Nord-Ouest Côte d'Ivoire. *Agriculture Durable, Souveraineté Alimentaire et Nutritionnelle. Université polytechnique de San Pedro (Côte d'Ivoire). 23 au 26 octobre 2024.*

Résumé

Le dérèglement climatique a des impacts sur les activités socio-économiques en Afrique de l'Ouest surtout en zone sahélienne depuis les années 1970. L'agriculture est l'activité la plus impactée. Ainsi, ce travail de recherche s'attèle à quantifier les ressources en eau dans le bassin versant du fleuve Sassandra à Sorotona, pour satisfaire les besoins en eau à court et moyen terme dans l'exploitation agricole de Borotou Koro, afin de garantir la production de sucre. La méthodologie a consisté dans un premier temps à caractériser les paramètres agroclimatiques dans le bassin versant à travers les variables que sont les débuts de saison de pluie (DSF), les fins de saisons de pluie (FSP), la longueur des saisons de pluie (LSP), le nombre de jour de pluie (NJP), le cumul pluviométrique saisonnier (CPS), la hauteur journalière moyenne de précipitation (HMP) et les séquences sèches (SS). Ensuite, les écoulements de surface dans le bassin versant ont été évalués à l'aide du modèle CEQUEAU, après avoir fait l'étude de la dynamique de l'occupation du sol, où les cartes d'occupation ont servi de support pour la modélisation. Enfin, le rapport de l'adéquation entre les besoins et la disponibilité de l'eau a été établi. Les résultats de la caractérisation des paramètres agroclimatiques montrent que le DSP connaît des retards, alors que les FSP sont de plus en plus précoces. Les LSP et le NJP observent une tendance au raccourcissement par la réduction de leurs cumuls journaliers. Les CSP et les HMP témoignent de la baisse des précipitations dans le bassin versant. Lors de l'évaluation de la ressource en eau, les résultats ont montré une abondance des écoulements sur la période d'observation 1970-2020. Par contre, pour les débits simulés (2021-2060) les écoulements varient selon les modèles climatiques. Les modèles RACMO22T et RCA4 prévoient une baisse des écoulements de 31% et 10% respectivement, alors que le modèle REMO2009 prévoit une hausse de ces débits de 110% par rapport aux écoulements observés. Le rapport de l'adéquation entre le besoin et la disponibilité montre que malgré la hausse des besoins en eau dans le complexe sucrier aux horizons futurs 2030 et 2060, les ressources en eau de surface simulées suffiront à satisfaire les besoins hydriques dans le complexe sucrier de Borotou Koro, même pendant les périodes de basses eaux.

Mots clés : Changements climatiques, Canne à sucre, Paramètres agroclimatiques ; Modèle CEQUEAU ; Rapport besoin-disponibilité.

Abstract

Climate change has had an impact on socio-economic activities in West Africa, especially in the Sahel region, since the 1970s. Agriculture is the activity most affected. The aim of this research is to quantify the water resources in the Sassandra River catchment area at Sorotona, in order to meet the short- and medium-term water requirements of the Borotou Koro farm and guarantee sugar production. The methodology consisted firstly in characterising the agroclimatic parameters in the catchment area through variables such as the start of the rainy season (DSF), the end of the rainy season (FSP), the length of the rainy season (LSP), the number of rainy days (NJP), the cumulative seasonal rainfall (CPS), the average daily rainfall (HMP) and the dry sequences (SS). Next, surface runoff in the catchment was assessed using CEQUEAU models, following a study of land-use dynamics, in which land-use maps were used as a basis for modelling. Finally, the relationship between water needs and availability was established. The results of the characterisation of the agroclimatic parameters show that the DSP are experiencing delays, while the FSP are increasingly early. The LSP and NJP show a shortening trend, with a reduction in their daily accumulations. The CSP and HMP show a decrease in rainfall in the catchment area. When assessing water resources, the results showed an abundance of runoff over the observation period (1970-2020). However, for simulated flows (2021-2060), runoff varies according to the climate models. The RACMO22T and RCA4 models predict a 31% and 10% decrease in runoff respectively, while the REMO2009 model predicts a 110% increase in runoff compared with observed runoff. The relationship between need and availability shows that, despite the increase in water requirements in the sugar complex in the future, the simulated surface water resources will be sufficient to meet water needs in the Borotou Koro sugar complex, even during low-water periods.

Keywords: Climate change, Sugar cane, Agroclimatic parameters; CEQUEAU model; Need-availability ratio.